

FRIEDRICH-SCHILLER-UNIVERSITÄT JENA  
Fakultät für Sozial- und Verhaltenswissenschaften  
Institut für Sportwissenschaft

# **Qualitätsprüfung vorhandener Konzepte zur Bestimmung der aerob – anaeroben Schwelle**

Diplomarbeit  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Diplom- Sportwissenschaftler/in

Vorgelegt von Stefan Brünner  
Geburtsdatum: 10.09.1973

Betreuer und Erstgutachter: Dr. H. – C. Wick

Jena, den 26.06.2008

## Inhaltsverzeichnis

1	Abstract.....	3
2	Einleitung .....	4
2.1	Die Rolle der Sportmedizin im Spannungsfeld des Leistungssports.....	4
2.2	Historische Betrachtung von ventilatorischen und von Laktatschwellen.....	8
2.3	Möglichkeiten und Grenzen der Laktat – Leistungs – Diagnostik (LLD).....	10
2.4	Intention der Arbeit.....	13
2.5	Arbeitshypothesen .....	16
3	Zentrale Problemstellungen in der LLD (Literaturanalyse) .....	17
3.1	Material und Methoden.....	17
3.2	Zentrale Problemstellungen in der LLD – Ergebnisse der Literaturanalyse.....	18
3.2.1	Überblick bestehender Schwellenkonzepte .....	18
3.2.1.1	„Aerob – anaerobe Schwelle“ nach Mader et al. (1976).....	20
3.2.1.2	„Anaerobe Schwelle“ nach Kindermann, Simon & Keul (1978) .....	21
3.2.1.3	„Individuelle anaerobe Schwelle“ nach Keul et al. (1979) .....	21
3.2.1.4	„Individuelle anaerobe Schwelle“ nach Pessenhofer et al. (1981) .....	22
3.2.1.5	„Anaerobe Schwelle“ nach Simon et al. (1981).....	22
3.2.1.6	„Individuelle anaerobe Schwelle“ nach Stegmann & Kindermann (1981b) .....	23
3.2.1.7	„Individual anaerobic threshold“ nach Bunc et al. (1982) .....	23
3.2.1.8	„Individuelle anaerobe Schwelle“ nach Dickhuth et al. (1988) .....	24
3.2.1.9	„Laktatsenke“ nach Griess et al. (1989) und Braumann et al. (1991).....	25
3.2.1.10	„Lactate threshold“ nach Cheng et al. (1992).....	25
3.2.1.11	„Individual anaerobic threshold“ nach Baldari & Guidetti (2000) .....	26
3.2.2	Fixe und individuelle Schwellenkonzepte im wissenschaftlichen Diskurs.....	27
3.2.3	Abhängigkeit der Schwellenbestimmung von beeinflussenden Kriterien .....	32
3.2.3.1	Kriterium „Belastungsschema / Testdesign“ .....	32
3.2.3.2	Kriterium „Ernährung / Glykogenspeicher“ .....	35
3.2.3.3	Kriterium „Vorbelastung“ .....	38
3.2.3.4	Kriterium „Ausbelastung“ .....	40
3.2.3.5	Kriterium „Trainingszustand“ .....	41
3.2.3.6	Kriterium „Dimension der Geschwindigkeit (m/s, km/h)“ .....	42
3.2.3.7	Kriterium „Anfangsbelastung“ .....	42
3.2.4	Verifizierung / Falsifizierung eines postulierten Anpassungsphänomens .....	43
3.2.5	Übertragbarkeit der Labor- / Feldtestergebnisse in Training und Wettkampf .....	45
3.2.6	Grundlegende Standardisierungsmaßnahmen .....	50
3.2.6.1	Spezifität der Belastungsform.....	51
3.2.6.2	Angleichung der Belastungsverhältnisse in Labor und Feld .....	52
3.2.6.3	Anpassung der LLK .....	55
3.2.6.4	Spiro – Ergometrie vs. Ergometrie .....	57
3.2.6.5	Testbedingungen .....	58
3.2.7	Modellierung biologischer Prozesse .....	59
4	Diskussion .....	63
4.1	Zur Problematik der Anwendung fixer und individueller Schwellen.....	63
4.1.1	Dauerleistungsgrenze und maximales Laktat steady state (maxLass) .....	63
4.1.2	Mittelwertangaben .....	64
4.1.3	Fix versus Individuell.....	66
4.1.4	Bevorzugt angewendete Schwellenkonzepte .....	69

4.2	Zur Problematik der Abhängigkeit von beeinflussenden Kriterien.....	71
4.3	Zur Problematik des postulierten Anpassungsphänomens .....	73
4.4	Zur Problematik des Transfers von der Theorie in die Praxis .....	74
4.4.1	Validierung der ermittelten Schwelle .....	75
4.4.2	Prognose von Wettkampfleistungen .....	76
4.4.3	Trainings- und wettkampfsteuernde Parameter .....	76
4.5	Zur Problematik grundlegender Standardisierungsmaßnahmen .....	78
4.6	Zur Problematik der Modellierung biologischer Prozesse.....	79
4.7	Kritische Betrachtung .....	81
5	Zusammenfassung .....	83
6	Literaturverzeichnis .....	86

## 1 Abstract

Die Zielsetzung dieser Arbeit bestand darin, die vorhandenen Konzepte zur Bestimmung der aerob – anaeroben Schwelle einer qualitativen Prüfung zu unterziehen. Mittels umfangreicher Literaturrecherche wurde diesbezüglich der Versuch unternommen, die Vielzahl der Forschungsbeiträge im Zusammenhang mit laktatbasierten leistungsdiagnostischen Untersuchungen zu sondieren, um nachfolgend die kritische Auseinandersetzung mit den verschiedenen Modellen zur Erhebung des Schwellenparameters zu dokumentieren. Als wesentliche Aufgabenstellung für die Literaturanalyse galt es, Empfehlungen beziehungsweise Richtlinien herauszufiltern, welche die Qualität der Ergebnisse der Laktat – Leistungs – Diagnostik (LLD) sichern und außerdem einen höchstmöglichen Transfer in die Trainings- und Wettkampfpraxis gewährleisten. Aufgrund der eigenen langjährigen Erfahrungen im Umgang mit leistungsdiagnostischen Untersuchungen wurden in einem weiteren Schritt ausgewählte Schwerpunkte diskutiert. Die Übertragbarkeit der Labor- und Feldtestergebnisse auf Training und Wettkampf wurde in diesem Zusammenhang als zentrale Problemstellung angesehen. Die vorliegende Untersuchung legt den Schluss nahe, dass die Anwendung individueller Laktatschwellenkonzepte zu präferieren ist. Speziell das Modell nach *Stegmann, Kindermann & Schnabel (1981a)* scheint diesbezüglich am praktikabelsten zu sein. Aufgrund der multiplen Abhängigkeit der verschiedenen Schwellenkonzepte von beeinflussenden Faktoren sowie von grundlegenden Standardisierungsmaßnahmen sollte allerdings auch darauf hingewiesen werden, dass lediglich die korrekte Vorbereitung, Durchführung und Interpretation von leistungsdiagnostischen Untersuchungen den erhofften Nutzen bezüglich der Optimierung der sportlichen Leistung bringen kann. Außerdem ist nur bei Beachtung wesentlicher Verhaltensregeln der wissenschaftliche Aufwand im Spannungsfeld der laktatbasierten Trainings- und Wettkampfsteuerung zu legitimieren.

## 2 Einleitung

Die vorliegende Arbeit verfolgt das Ziel, aus der Vielzahl vorhandener Literaturbeiträge sowie deren Forschungsinhalten wesentliche Problemstellungen der LLD herauszufiltern und diese in einem weiteren Schritt detailliert darzustellen. Vorrangig soll es darum gehen, die umfangreiche wissenschaftliche Basis zu sondieren, zu prüfen und kritisch zu diskutieren, um im Ergebnis mögliche praxisrelevante Ableitungen für die zentralen Aufgabenbereiche der Laktat – Leistungs – Diagnostik (LLD) treffen zu können.

Vorerst erscheint es jedoch sinnvoll, einige einleitende Gedanken zu äußern, welche sich der Literaturanalyse aus verschiedenen Perspektiven hinführend nähern. Am Beginn des einleitenden Abschnitts steht eine kurze Darstellung der Rolle der Sportmedizin im Spannungsfeld des (Leistungs-) Sports und eine Abgrenzung wesentlicher Begrifflichkeiten. Außerdem sollen die Aufgabenbereiche der Sportmedizin und im engeren Sinne die der Leistungsdiagnostik dargestellt werden. Daran schließt sich ein kurzer Überblick bezüglich ventilatorischer Schwellen und Laktatschwellen an, um schlussfolgernd Möglichkeiten und Grenzen der LLD aufzuzeigen. Genau diese Problemstellung bildet das Fundament der Arbeitshypothesen, die wiederum den zentralen Schwerpunkt von Literaturanalyse und anschließender Diskussion bilden.

### 2.1 Die Rolle der Sportmedizin im Spannungsfeld des Leistungssports

Um die Frage nach den Wurzeln des (Leistungs-) Sports zu beantworten, ist es notwendig, die im Mittelpunkt stehenden Begrifflichkeiten abzugrenzen. Der zentrale Begriff der vorliegenden Arbeit ist die Leistung. Leistung im physikalischen Sinne beschreibt die pro Zeiteinheit verrichtete Arbeit. Sportliche Leistung im engeren Sinne kann nach *Martin, Carl & Lehnertz (1993)* als das Ergebnis einer sportlichen Handlung verstanden werden, welches einer geschaffenen Wertordnung unterliegt und in einer bestimmten Maßzahl Niederschlag findet. Um sich neben der sportlichen Leistung dem Begriff Leistungssport zu nähern, erscheint es vorerst notwendig, auf das Bestimmungswort Sport einzugehen. *Schnabel & Thieß (1993)* formulieren Sport als ein gesellschaftliches Phänomen, welches die sportliche Tätigkeit institutionalisiert. Historisch betrachtet, wurzelt der Begriff Sport in dem lateinischen

Wort deportare, welches wegtragen und im spätlateinischen soviel wie sich zerstreuen, sich vergnügen bedeutet. Die eigentliche Kurzform sport tauchte erstmals 1440 in der neuenglischen Sprache (to disport) auf. Aufgrund der gesellschaftlichen Verwurzelung des Begriffs Sport und seiner sprachlichen Herkunft können die Ursprünge sportlicher und sicherlich auch Leistungssportlicher Tätigkeit bis in die Antike zurückverfolgt werden. Die Olympischen Spiele gelten in der heutigen Zeit als eine Art Symbol für den Sport und speziell für den Leistungssport. Der hohe ethische Anspruch des ursprünglichen pädagogischen Konzepts der Olympischen Erziehung von *Baron de Coubertin* ist nach wie vor omnipräsent, auch wenn die mit diesem Konzept im Zusammenhang stehenden Ideale einem zunehmenden moralischen Verfall im internationalen Spitzensport erliegen. Außerdem ist oft genug festzustellen, dass insbesondere angesehene und hochrangige Funktionäre beziehungsweise Repräsentanten des Sports die ursprünglichen olympischen Ideale im Sinne übergeordneter Interessen instrumentalisieren, und somit viele Äußerungen eher Lippenbekenntnissen gleichen als das sie handlungsleitende Kriterien darstellen. *Hollmann (1987)* ging in seinem Hauptreferat des Deutschen Sportärztekongresses 1986 in Kiel sogar so weit, dass er bezüglich der Entwicklung der Olympischen Bewegung formulierte:

„Der Leitspruch unter dem man antrat, lautete: citius, altius, fortius. Durch die Eigengesetzlichkeiten des Hochleistungssports hatten diese Personen unbewusst den Grundstein gelegt zu einem gigantischen biologischen Experiment mit dem Menschen.“ (*Hollmann, 1987, 15*).

Im Folgenden wird der Versuch unternommen, die Aufgaben der Sportmedizin abzustecken, um damit eine Überleitung zur „Philosophie“ leistungsdiagnostischer Untersuchungen zu schaffen. *Kindermann (1979)* beschreibt in seiner Publikation die wesentlichen Aufgabenbereiche. Zum einen sollten die Sportmedizin und damit der Sportmediziner an der Wahrung der gesundheitlichen Interessen der Sportler interessiert sein. Zum anderen sind der Einfluss von Bewegung jeder Art und Intensität sowie die Auswirkungen von Bewegungsmangel auf den Organismus als wesentliche Gegenstände für die Sportmedizin anzusehen. Der Leistungssport stellt nach *Kindermann (1979)* in diesem Zusammenhang lediglich die Spitze der Bewegungspyramide dar. *Mellerowicz (1989)* bezeichnet es als vornehmste Aufgabe der Sportmedizin, dass sie akute und chronische Fehl- und Überbeanspruchungen,

die zu Sportverletzungen und Sportschäden führen, verhütet und ihre erkennbaren Ursachen so weit wie möglich behebt. Ein weiterer, zunehmend dringlich erscheinender Aufgabenbereich stellt nach *Kindermann (1979)* die Eruiierung der Risiken einer pharmakologischen Manipulation sowie deren wissenschaftliche Belegung dar. Außerdem verweist er darauf, dass die Erstellung wirkungsvoller Antidopingmaßnahmen als ein weiteres Betätigungsfeld anzusehen ist. Diesem Standpunkt ist in der heutigen Zeit, in der kaum ein Tag ohne medienwirksame Dopingschlagzeile vergeht, nichts hinzuzufügen. Dass diese Aussage mittlerweile bald 30 Jahre zurückliegt, zeigt vielmehr die außerordentliche Schwierigkeit der Durchsetzung dieser Forderung. Außerdem hätte spätestens durch die Äußerung von *Mellerowicz (1989)*, nach der es keine pharmakologische Substanz gibt, durch welche die Höchstleistung des Höchsttrainierten unschädlich weiter gesteigert werden kann, der Beteiligung von Medizinern und Ärzten an der unerlaubten medikamentösen Leistungssteigerung von Sportlern ein Ende gesetzt werden müssen. Ein Blick auf die aktuelle Situation zeigt jedoch, dass die Entwicklung anders verlief. *Prokop (1989)* formulierte in diesem Zusammenhang sehr treffend, dass der Sportarzt sich vielmehr darum kümmern sollte, dass der Sport wieder zu seiner Hauptaufgabe zurückfindet. Diese besteht nach seiner Ansicht im Ausgleich, in der Therapie und in der Vorbeugung gegenüber den vielen negativen Auswirkungen unserer Überzivilisation und der falsch verstandenen Leistungsgesellschaft. Wenn *Franke & Ludwig (2007)* konstatieren, dass das Sportsystem dermaßen verrottet und somit auch keine Rettung möglich ist, kann dies auch als zusätzlicher Hilferuf in Richtung Sportmedizin aufgefasst werden. Vor den Verfehlungen des Sportsystems und seiner in ihm handelnden Akteure zu kapitulieren, wäre in diesem Zusammenhang ein kontrovers zu diskutierender Weg. Die Feststellung von *Bette (2008)*, dass nicht wenige Akteure im Spitzensport von der „brauchbaren Illegalität“ des unentdeckten Dopings der Athleten noch so stark zu profitieren scheinen, dass ein dringlicher und pauschaler Veränderungswillen nicht unterstellt werden kann, verdeutlicht die oben genannte Problematik zusätzlich. Die komplexen soziologischen Zusammenhänge sollten nicht dazu führen, bestimmte Fehlentwicklungen zu legitimieren beziehungsweise die Verantwortung für die genannten Phänomene zu delegieren. Vielmehr scheint es die Aufgabe eines jeden von uns und speziell die Aufgabe des Sportmediziners zu sein, sich dafür

einzusetzen, dass wir mit Hilfe des Sports gesünder Sterben und nicht kränker Leben (*Prokop, 1989*).

Die vorliegende Arbeit kann beziehungsweise soll an dieser Stelle auch als kleiner Appell an den sauberen Sport verstanden werden. Sie liefert im weiteren Verlauf eine Grundlage, welche es ermöglichen soll, die Leistungsentwicklung speziell im Ausdauerbereich zu optimieren, ohne im Konzert des modernen Leistungssports und seinem systemimmanenten moralischen Verfall mitzuspielen. Die Arbeit soll somit ein Hilfsmittel darstellen, welches es ermöglicht, die physiologische Ausdauerleistungsfähigkeit ohne unerlaubte Um- beziehungsweise Abwege zu optimieren. In diesem Zusammenhang erlangen speziell die leistungsdiagnostische Untersuchung und die mit ihr verbundenen Ableitungen und Interpretationen eine entscheidende Bedeutung. Schon *Donath, Clausnitzer & Schüler (1969)* formulierten die Aufgaben der sportmedizinischen Funktionsdiagnostik recht treffend. Neben der Möglichkeit zwischen Trainierten und Untrainierten morphologische und funktionelle Unterschiede sichtbar zu machen, stellten sie weiterhin fest, dass es Aufgabe der Funktionsdiagnostik im medizinischen Bereich sein muss, trainingsbedingte Veränderungen der Funktion eines an der sportlichen Leistung maßgeblich mitwirkenden Systems zu erfassen, um daraus Rückschlüsse auf die Effektivität vorangegangener Trainingszyklen zu ziehen. Nach *Schnabel & Thieß (1993)* stellt die Leistungsdiagnostik (LD) das Verfahren beziehungsweise die Lehre der Leistungsdiagnose dar. Die Leistungsdiagnose wird dabei als die Ermittlung des Entwicklungsstandes der Leistungsfähigkeit und Leistungsbereitschaft durch die Erfassung, Bewertung und Beurteilung von Kenngrößen, Kennlinien oder Merkmalen des aktuellen Leistungsvollzuges verstanden. Nachfolgend soll in Ergänzung zu den Formulierungen von *Donath, Clausnitzer & Schüler (1969)* und *Schnabel & Thieß (1993)* eine zusammenfassende Darstellung der Zielsetzungen von leistungsdiagnostischen Untersuchungen erfolgen:

- Feststellung der Grenzen der menschlichen Leistungsfähigkeit,
- Erhebung der Leistungsentwicklung im Längsschnitt (*Heck & Hollmann, 1985b; Heck & Schulz, 1999*),
- Erfassung der für die Wettkampfleistung bestimmenden Teilkomponenten (*Dickhuth et al., 1996*),



- Prognose von Wettkampfleistungen (*Rieder, Weiler & Kindermann, 1987a; Röcker et al., 1997*),
- Aufzeigen morphologischer und funktioneller Unterschiede zwischen Trainierten und Untrainierten (*Donath, Clausnitzer & Schüler, 1969*),
- Entwurf von Rangordnungen beziehungsweise Normwerten durch Querschnittsuntersuchungen in bestimmten Kollektiven (*Heck & Hollmann, 1985b*),
- Prüfung der Effizienz bestimmter Trainingsmittel und Trainingszyklen (*Donath, Clausnitzer & Schüler, 1969*),
- Differenzierung von leistungsbestimmenden Faktoren (*Röcker & Dickhuth, 1994*)
- Abgrenzung physiologischer und pathologischer Phänomene,
- Erstellung von Differentialdiagnosen ...

Um die komplexe Problematik leistungsdiagnostischer Untersuchungen besser erfassen zu können, schließt sich im nächsten Abschnitt eine historische Betrachtung der LD und der mit ihr im Zusammenhang stehenden Schwellenbestimmung an.

## **2.2 Historische Betrachtung von ventilatorischen und von Laktatschwellen**

*Hollmann* nimmt bezüglich der Ursprünge der LD und der mit ihr in Verbindung stehenden Schwellenkonzepte eine Schlüsselposition ein. Deshalb soll im Folgenden eine Zusammenfassung der Darstellungen von *Hollmann (1999)* bezüglich ventilatorischer und Laktatschwellen erfolgen.

Erste grundlegende Untersuchungen zur Bestimmung der menschlichen Leistungsfähigkeit fanden zwischen 1922 und 1925 durch *Hill* und Mitarbeiter statt. Über die Messung der maximalen Sauerstoffaufnahme ( $\text{VO}_2\text{max}$ ) besaß man erstmals ein Bruttokriterium der kardiopulmonalen Kapazität. Zwei wesentliche Probleme traten jedoch im Zusammenhang mit der Bestimmung der  $\text{VO}_2\text{max}$  auf. Zum einen bestand eine Abhängigkeit der Ergebnisse von der Motivationslage des Untersuchten und zum anderen konnten bei Eintritt in den individuellen Grenzbereich eines Patienten Zwischenfälle provoziert werden. Ab 1954 ergaben sich daraus Überlegungen von *Venrath, Schild* und *Hollmann*, ein submaximales Kriterium zur

Bestimmung der körperlichen Leistungsfähigkeit zu nutzen. Erste Versuche über Pyruvat- und später über Milchsäure- beziehungsweise Laktatmessungen brauchbare Ergebnisse zu erhalten, wurden aufgrund der langwierigen Bestimmungen und der relativ geringen Differenzen bei Messungen aus dem venösen Blut unter moderaten Belastungen verworfen. In der Folgezeit widmete sich die Arbeitsgruppe um *Hollmann* verstärkt dem Verhalten des Atemminutenvolumens (AMV) und des Atemäquivalents (ÄÄ). Die Befunde ermöglichten es, dass *Hollmann* und Mitarbeiter auf dem 3. Panamerikanischen Sportärztekongress in Chicago 1959 erstmals über die Bedeutung einer spiroergometrischen Ermittlung des aerob – anaeroben Umschlagpunktes zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit gesunder und kranker Personen berichteten. Dabei unterschied dieser Arbeitskreis zwischen einer ventilatorischen und einer laktatbezogenen Bestimmungsmethode. Die ventilatorische Schwelle wurde als „Punkt des optimalen Wirkungsgrades der Atmung“ (PoW) bezeichnet. Die laktatbezogene Bestimmungsmethode konnte dagegen genutzt werden, um mit Hilfe der „Puls – Dauerleistungsgrenze“ eine Möglichkeit der praktischen Umsetzung aufzuzeigen. In Abb. 1 werden die verschiedenen Messgrößen dargestellt.

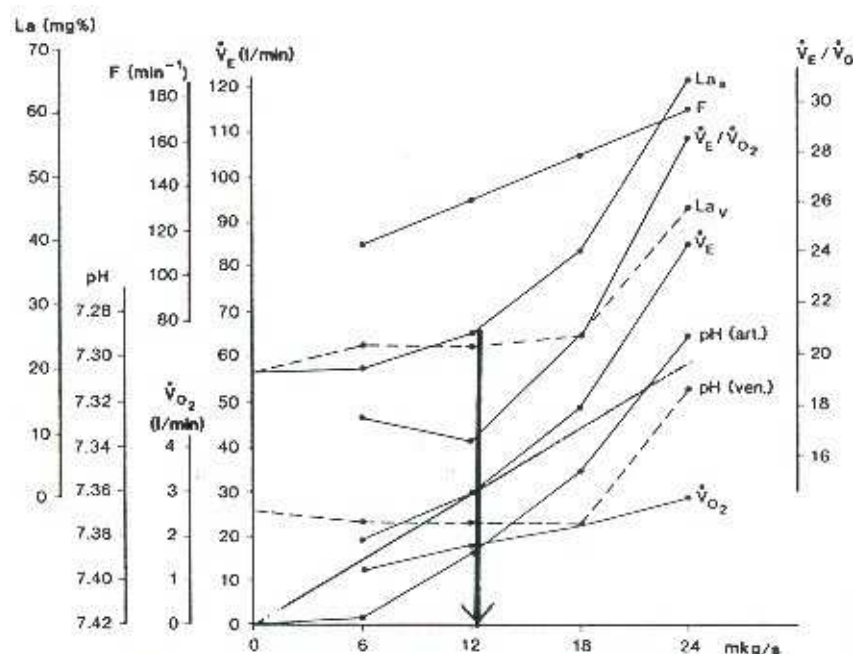


Abb. 1: Die Sauerstoffaufnahme ( $\dot{V}_{O_2}$ ), das Atemminutenvolumen ( $\dot{V}_E$ ), das Atemäquivalent ( $\dot{V}_E / \dot{V}_{O_2}$ ), die Herzfrequenz ( $F$ ), der arterielle Laktatwert ( $La_a$ ), der venöse Laktatwert ( $La_v$ ), und der arterielle pH – Wert bei dreiminütiger Stufendauer auf dem Fahrradergometer. Mit Hilfe des Pfeils werden außerdem die ventilatorische Schwelle (PoW) und die aerobe Laktatschwelle gekennzeichnet. Abb. aus *Hollmann (1999)*.

Obwohl schon damals die Bestimmung der Laktat – Leistungs – Kurve (LLK) zuverlässiger als die der Ventilationskurve erschien, wurde, aufgrund der mit der arteriellen Blutabnahme im Zusammenhang stehenden Probleme, in den Folgejahren die Ermittlung des PoW vorgezogen. Ab 1963 war es möglich, Laktat mit Hilfe der enzymatischen Methode zu bestimmen und damit den oben genannten Problemen zu begegnen. 1973 führte *Mader* die Blutentnahme aus dem hyperämisierten Ohr ein, welche identische Werte mit dem Blut aus der *A. brachialis* ergab. Mit diesem Schritt war der Weg für die LLD endgültig geebnet, was sich in den Folgejahren mit der Entwicklung verschiedener Schwellenkonzepte zeigen sollte. *Mader et al. (1976)* können in diesem Zusammenhang „als Begründer des Laktat – Schwellenkonzepts in der Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung angesehen werden.“ (*Heck, 2004, 271*). Trotz aller Differenzen und Unterschiede in der Bestimmung der Schwellen bleibt der Schlussbemerkung von *Hollmann (1999)* in seiner historischen Abhandlung über ventilatorische und Laktatschwellen nichts hinzuzufügen:

„Das Grundprinzip der dargestellten Gedankengänge, mittels submaximaler Belastung die individuelle aerobe Leistungsfähigkeit beurteilen zu können, ist in der Folgezeit vielfach bereichert worden, ohne den ursprünglichen Gedanken verändert zu haben.“ (*Hollmann, 1999, 325*).

### **2.3 Möglichkeiten und Grenzen der Laktat – Leistungs – Diagnostik (LLD)**

Vor nahezu 20 Jahren formulierte *Kindermann (1989)*, dass aus seiner Sicht kein Verfahren existiert, welches der LLD überlegen ist oder ihr den Rang ablaufen könnte. Eine ähnliche Meinung vertreten *Weicker & Braumann (1994)*, indem sie Laktat als leicht bestimmbaren Parameter bezeichnen, der, wenn bestimmte Rahmenbedingungen eingehalten werden, von anderen im Kapillarblut routinemäßig bestimmbaren Größen in seiner Aussagekraft kaum übertroffen werden kann. Laut *Gaisl et al. (1980)* ist die Bestimmung des aerob – anaeroben Übergangs für das Ausdauertraining von größter Bedeutung, da die Möglichkeit besteht, exakte Aussagen über die Leistungsentwicklung und damit den Trainingserfolg zu treffen. Durch die Betrachtung der heutigen Situation beziehungsweise durch den Blick auf die gängige Praxis leistungsdiagnostischer Untersuchungen kann die außerordentliche Aktualität dieser Formulierungen konstatiert werden. Die angesprochene gängige Praxis schützt jedoch nicht vor problematischen

beziehungsweise im Extremfall vor Fehlentwicklungen. Aus diesem Grund sollen an dieser Stelle neben den Möglichkeiten der LLD auch deren immanente Grenzen aufgezeigt werden. Eine ausführliche Diskussion des umfangreichen Literaturfundus bezüglich der Durchführung leistungsdiagnostischer Untersuchungen und der anhand der erhaltenen Ergebnisse getroffenen Ableitungen wird in Abschnitt 4 (Diskussion) vorgenommen.

Im Gegensatz zu den oben genannten Aussagen muss festgestellt werden, dass speziell der Arbeitskreis um *Heck* der LLD und den verschiedenen Schwellenkonzepten kritisch gegenübersteht. *Heck, Hess & Mader (1985a)* formulierten in diesem Zusammenhang, dass es ihrer Meinung nach mit keiner Schwelle – fix oder individuell – möglich ist, das Training ohne zusätzliche Information aus der Trainingspraxis aufgrund empirischer Untersuchungen zu steuern. Den relativ drastisch formulierten Grenzen der LLD wird somit gleichzeitig der Weg gewiesen, um den möglichen Transfer der Ergebnisse aus den leistungsdiagnostischen Untersuchungen in die Trainingspraxis beziehungsweise in den Trainingsprozess zu gewährleisten. Umso erstaunlicher ist es jedoch, dass *Heck & Roszkopf (1994)* fast 10 Jahre später feststellen mussten, dass zur Validierung der Anwendbarkeit der verschiedenen Schwellenkonzepte zur Trainingssteuerung keine Studien durchgeführt wurden beziehungsweise diese nur einen eingeschränkten Aussagewert besaßen. Sie behaupteten sogar, dass es keine experimentelle Grundlage für ein „maxLass – orientiertes“ und somit für ein „schwellengesteuertes“ Training gibt. Die Aussage „Wir empfehlen deshalb, alle Schwellenkonzepte bezogen auf die Trainingssteuerung aufzugeben.“ (*Heck & Roszkopf, 1994, 127*) erscheint in diesem Kontext folgerichtig und durchaus nachvollziehbar. Erneut wiesen sie jedoch die Richtung für den zukünftigen Umgang mit der LLD und den trainingssteuernden Möglichkeiten von Schwellenkonzepten. Sie empfahlen, dass sich die Anwender von leistungsdiagnostischen Untersuchungen auf ein einheitliches, auf die Sportpraxis bezogenes Testschema einigen sollten. Damit würde ihrer Meinung nach auch die Notwendigkeit entfallen, die verschiedenen Schwellenkonzepte zu validieren und gegeneinander zu behaupten. Spezifische Testbedingungen der jeweiligen Schwelle würden entfallen. Mögliche frei werdende wissenschaftliche Ressourcen, welche durch den Verzicht auf umfangreiche experimentelle Studien entstehen, könnten damit wichtigen trainingswissenschaftlichen Fragestellungen zugeführt werden. Auch

*Braumann, Busse & Maassen (1987)* mussten aufgrund eigener Befunde feststellen, dass eine exakte Trainingssteuerung mit Hilfe der LLK nicht möglich ist. Aus diesem Arbeitskreis stammt auch die Aussage, dass entgegen langjähriger Praxis das Blutlaktat unter Belastung kein relevantes Kriterium der Ausdauerfähigkeit ist (*Busse et al., 1987*). Diese recht deutlichen Botschaften von Seiten des oben genannten Arbeitskreises entstanden aufgrund der Tatsache, dass der Verlauf der LLK eine sehr starke Abhängigkeit vom Glykogengehalt der Muskulatur aufweist und somit keine eindeutige Zuordnung eines bestimmten Niveaus der Ausdauerfähigkeit möglich ist. Jedoch werden auch von *Braumann, Busse & Maassen (1987)* die Potenzen beziehungsweise Möglichkeiten der LLD aufgezeigt, indem sie formulieren, dass sich mit etwas mehr Hintergrundwissen über das Zustandekommen der LLK durchaus Verlaufsbeobachtungen machen lassen, welche durch eine Lageverschiebung der LLK recht konkrete Aussagen über die Effizienz einer durchgeführten Trainingsperiode erlauben. Weiterhin halten sie fest, dass dies nur durch höchstmögliche Standardisierung gewährleistet werden kann.

Während der Sichtung und Analyse der Literatur konnte außerdem festgestellt werden, dass neben den kritischen Reflexionen der LLD auch häufig deren Möglichkeiten formuliert wurden, um die außerordentliche Bedeutung zu belegen. Gründe dafür wurden von verschiedenen Personen und Arbeitskreisen immer wieder aufgezeigt. So schreibt *Böning (1994)*, dass die Bestimmung der arteriellen Blutlaktatkonzentration und das Konzept der Schwellen die LLD methodisch einfach und für jeden handhabbar macht. Außerdem verweist er darauf, dass von Erfahrenen relevante Schlüsse über die Leistungsfähigkeit des Probanden gezogen werden können. Durch den Hinweis „dass Simplifikationen zum Scheitern verurteilt sind“ (*Böning, 1994, 219*) wird jedoch auch hier darauf verwiesen, dass die Möglichkeiten nicht uneingeschränkt sind und dass aufgrund der Fehler im Umgang mit der LLD die Trainingsteuerung mit Hilfe von Laktattests problematisch ist. Die Formulierung von *Bueno (1990)*, dass das Schwellenkonzept im Allgemeinen kein Dogma ist, und dass die Ergebnisse der Anwendung dieses Konzepts nicht als eine Verpflichtung sondern vielmehr als eine Leitlinie aufgefasst werden sollten, hat im Zusammenhang mit den Möglichkeiten und Grenzen der LLD eine scheinbar integrative Funktion bezüglich der verschiedenen Standpunkte. Um den optimalen Transfer der Ergebnisse zu gewährleisten und um die Ausdauerleistungsfähigkeit zu evaluieren,

ist es notwendig, trotz der immanenten Interpretationsschwierigkeiten, der möglichen Fehlerquellen und der Unsicherheiten bezüglich der Signifikanz der Schwelle, die Messungen und die Auswertung der LLK höchstmöglich zu standardisieren (*Bueno, 1990*). *Dickhuth et al. (1989)* äußerten sich diesbezüglich recht treffend und formulierten, dass die Möglichkeiten der modernen Leistungsmedizin weder überschwänglich bewertet und propagiert werden sollten, noch sollte Anlass bestehen, auf ihre Fortschritte zu verzichten. Genau diese Aussage bestätigt beziehungsweise begründet die eingangs getroffene Feststellung, dass die LLD die dominante Methode zur Bestimmung der physischen Leistungsfähigkeit darstellt, und sie wahrscheinlich auch in nächster Zukunft unentbehrlich bleibt.

## **2.4 Intention der Arbeit**

Um die Zielsetzungen der vorliegenden Arbeit beschreiben zu können, erscheint es vorerst notwendig, einen kleinen Rückblick in die Entstehung der Schwellenkonzepte und in den daraus resultierenden wissenschaftlichen Diskurs zu geben.

Wie im Verlauf der Einleitung schon erwähnt, kann dem Arbeitskreis um *Hollmann (1999)* eine Schlüsselfunktion im Zusammenhang mit der modernen Leistungsmedizin zugeschrieben werden. Gleiches gilt bezüglich der LLD und der abgeleiteten Schwellenkonzepte für *Mader* und Mitarbeiter (*Hollmann, 1999; Heck, 2004*). Vor nunmehr fast 25 Jahren begannen *Heck, Hess & Mader (1985a)* damit, die verschiedenen Schwellenkonzepte kritisch zu prüfen (vgl. 2.3). Seit dieser Zeit sind viele Experimente und Studien durchgeführt wurden, um letztendlich die Konzepte entweder zu verifizieren, zu falsifizieren oder das eigene Konzept hervorzuheben. Diese Arbeit wird versuchen, die Vielzahl von Forschungsergebnissen zusammenzuführen, in der Hoffnung, neue Erkenntnisse zu gewinnen. Weiterhin besteht das Ziel darin, Ableitungen zu treffen, welche es ermöglichen, die Qualität der Labor- beziehungsweise Feldtestergebnisse zu sichern und außerdem den höchstmöglichen Transfer der erhaltenen Testergebnisse in die Praxis (Training, Wettkampf) zu gewährleisten.

Im Folgenden werden die einzelnen Schwerpunkte nochmals kurz beschrieben werden, um in einem weiteren Schritt die Arbeitshypothesen formulieren zu können. Außerdem wird der eigene wissenschaftliche Beitrag skizziert, welcher sich aus der



Literaturanalyse und den damit im Zusammenhang stehenden Fragestellungen ergibt.

Der erste grundsätzliche Schwerpunkt beschäftigt sich mit der Problematik, ob die Entwicklung individueller Konzepte zur Bestimmung der aerob – anaeroben Schwelle die LLD bereichert hat. In diesem Zusammenhang scheint es vorerst notwendig zu sein, die Begriffe „fixe Schwelle“ und „individuelle Schwelle“ abzugrenzen und grundlegende Stärken und Schwächen aufzuzeigen. Außerdem untersucht die vorliegende Arbeit, in wie weit es mit Hilfe der individuellen Schwellenkonzepte möglich ist, eine genauere Trainingssteuerung als mit fixen Laktatschwellen zu gewährleisten (*Baldari & Guidetti, 2000; Fröhlich et al., 1989; Heck, Hess & Mader, 1985a; Heck & Roskopf, 1994; Kindermann, 1984; Schmidt et al., 1993; Stegmann & Kindermann, 1982; Urhausen et al., 1993; Van Schuylenberg, Vanden Eynde & Hespel, 2004 u. a.*). Neben der diagnostischen Feststellung der Leistungsentwicklung beziehungsweise des Trainingsfortschrittes eines Probanden im Längsschnitt besteht die Notwendigkeit, die multiple Abhängigkeit der Ergebnisse der LLD von bestimmten Kriterien darzustellen. In diesem Zusammenhang bietet es sich an, auf ein postuliertes Anpassungsphänomen, welches durch Ausdauertraining hervorgerufen werden soll, einzugehen. Es handelt sich dabei um das „Postulat“, nach dem mit zunehmender Ausdauerleistungsfähigkeit der Laktatwert an der aerob – anaeroben Schwelle sinkt. Diese Feststellung wird in zahlreichen sportmedizinischen und trainingswissenschaftlichen Beiträgen kontrovers diskutiert (*Donath, Clausnitzer & Schüler, 1969; Föhrenbach et al., 1985; Heck, 1990a; Heck, Hess & Mader, 1985a; Heck & Roskopf, 1994; Keul et al., 1979; Kindermann, 1984; Kindermann, 2004a; Neumann & Gohlitz, 1996; Stegmann, Kindermann & Schnabel, 1981a; Stegmann & Kindermann, 1981b; Tschopp et al., 2001; Urhausen et al., 1994 u. a.*). Deshalb soll auch dieser Thematik in der vorliegenden Arbeit nachgegangen werden. Die Frage der Übertragbarkeit der Labor- beziehungsweise Feldtestergebnisse in die Praxis (Training, Wettkampf) stellt einen weiteren wesentlichen Schwerpunkt im wissenschaftlichen Diskurs bezüglich der Tauglichkeit der Schwellenkonzepte dar (*Bachmann & Burtcher, 1999; Böning, 1994; Bueno, 1990; Dickhuth et al., 1989; Föhrenbach et al., 1985; Heck et al., 1986; Heck, 1990b; Kindermann, 1979; Liesen et al., 1985; Urhausen et al., 1994 u. a.*). Die Notwendigkeit, diese Fragestellung ins Zentrum der Betrachtung zu stellen, ist

dadurch begründet, dass nur bei einem qualitativ hochwertigen Transfer der hohe wissenschaftliche Aufwand bezüglich der Trainingssteuerung gerechtfertigt erscheint. In diesem Zusammenhang ist es außerdem notwendig, die grundlegenden Standardisierungsmaßnahmen zu kennzeichnen, welche generell, das heißt unabhängig vom jeweiligen Schwellenkonzept, notwendig sind beziehungsweise beachtet werden sollten (*Bachl et al., 1994; Böning, 1994; Braumann, Busse & Maassen, 1987; Donath, Clausnitzer & Schüler, 1969; Heck & Hollmann, 1985b; Heck & Schulz, 1999; Keul et al., 1981; Tschopp et al., 2001*). Einen weiteren zentralen Ansatz soll die Betrachtung von Modellierungsprozessen der Laktat – Leistungs – Beziehung darstellen. *Mader, Heck & Hollmann (1981)* formulierten diesbezüglich, dass sich die Sportmedizin und insbesondere die Forschung in ihr noch weitgehend im nichttheoretischen experimentellen Stadium einer deskriptiven Wissenschaft befindet. Ob dieser Standpunkt auch heute noch haltbar ist, bleibt zu untersuchen. Außerdem wird der Versuch unternommen, die Potenzen der theoretischen Betrachtung der Laktatkinetik unter Belastung bezüglich der Optimierung des Trainingsprozesses abzustecken (*Heck & Schulz, 2002; Hille & Geiger, 1993; Mader, Heck & Hollmann, 1981; Mader, 1994; Mader & Heck, 1994; Pessenhofer et al., 1987; Pessenhofer & Schwabberger, 1994*). Neben der Betrachtung und Analyse der bestehenden Schwellenkonzepte und der damit verbundenen Problemstellungen in der Literatur, soll die Aufgabe dieser Arbeit darin bestehen, die bevorzugt angewandten Konzepte gegeneinander zu prüfen. Anhand einer Liste mit Kriterien, von denen die Ergebnisse der LLD abhängig sind, wird versucht, die angesprochene Prüfung vorzunehmen. Eine praxisbezogene Ableitung dieser Zielstellung könnte darin bestehen, die Schwellenkonzepte in eine qualitative Rangordnung zu überführen.

Möglicherweise kann die vorliegende Arbeit auch einen kleinen Beitrag dazu leisten, dass entweder unter höchstmöglicher Standardisierung weiterhin verschiedene Konzepte zur Bestimmung der aerob – anaeroben Schwelle zur Anwendung kommen, oder dass ein Konzept bevorzugt werden kann, welches die geringste Abhängigkeit von externen Faktoren aufweist. Weiterhin könnte die Untersuchung dazu dienen, bei spezifischen Fragestellungen beziehungsweise bei verschiedenen Ausgangssituationen des Probanden, das entsprechende Schwellenkonzept



auszuwählen, um bei der Durchführung der LLD und bei der Ableitung von Trainingsempfehlungen den optimalen Erfolg zu erzielen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das Hauptanliegen dieser Studie darin besteht, den selektierten Literaturfundus bezüglich der zentralen Problemstellungen zu analysieren und kritisch zu reflektieren. Dabei sollen neben den Möglichkeiten der LLD auch deren Grenzen aufgezeigt werden.

## **2.5 Arbeitshypothesen**

Aus den Gedankengängen bezüglich der Intention der vorliegenden Arbeit können die folgenden Arbeitshypothesen abgeleitet werden:

- I** Individuelle Laktatschwellenkonzepte zur Bestimmung der aerob – anaeroben Schwelle sind bezüglich der Trainings- und Wettkampfsteuerung besser geeignet als Konzepte mit fixen Laktatschwellen.
- II** Die Übertragbarkeit der Labor- beziehungsweise Feldtestergebnisse auf Training und Wettkampf, das heißt der Transfer von der Theorie in die Praxis, kann nur bei höchstmöglicher Standardisierung gewährleistet werden.
- III** Die Modellierung der Laktat – Leistungs – Beziehung und die damit im Zusammenhang stehenden theoretischen Überlegungen sind in der Lage, die klassische LLD zu bereichern und die Trainingssteuerung zu verbessern.
- IV** Durch den Entwurf einer Liste mit ausgewählten Kriterien, von denen die Ergebnisse der LLD abhängig sind, ist es möglich, die angewendeten Konzepte zur Bestimmung der aerob – anaeroben Schwelle gegeneinander zu prüfen und diese gegebenenfalls in eine qualitative Rangordnung zu überführen.

### 3 Zentrale Problemstellungen in der LLD (Literaturanalyse)

#### 3.1 Material und Methoden

Die Idee zur Anfertigung dieser Arbeit basiert auf der eigenen langjährigen leistungssportlichen Verwurzelung in verschiedenen Sportarten (Leichtathletik, Radsport, Duathlon / Triathlon). Im Verlauf dieser Zeit entstand nahezu zwangsläufig ein großes Interesse an sportmedizinischen Untersuchungen, da diese speziell im Hochleistungssport einen wichtigen Beitrag zur Optimierung der sportlichen Leistung erbringen können. Die erstmalige Durchführung einer LLD erfolgte 1995. Während meiner aktiven Zeit als Straßenradsportler (1995 – 2001) wurden diese teilweise mehrfach pro Jahr vorgenommen.

Eine intensive inhaltliche Beschäftigung mit der Thematik leistungsdiagnostischer Untersuchungen begann allerdings erst nach dem Ende der aktiven Laufbahn im Verlauf des Studiums für Sportwissenschaft an der Friedrich – Schiller – Universität (FSU) in Jena. Die Doktorarbeit von *Coen (1997)* und vor allem die Habilitationsschrift von *Heck (1990a)* nehmen bezüglich der kritischen Analyse der Ergebnisse der LLD und deren Interpretation eine Schlüsselposition ein. Somit sind die genannten Autoren als Wegbereiter für die thematische Ausrichtung der Diplomarbeit anzusehen. Zu Beginn der Auseinandersetzung wurde neben der Eingrenzung des Diplomarbeitsthemas auch die Entscheidung getroffen, eine Literatarbeit anzufertigen, da für ein experimentelles Design die organisatorischen Rahmenbedingungen nicht gegeben waren. Nach der inhaltlichen Zentrierung der Arbeit sowie der Festlegung der Vorgehensweise erfolgte eine umfangreiche Literaturrecherche unter vorrangiger Nutzung der Zweigbibliothek Sportwissenschaft der FSU Jena. Außerdem wurden die elektronischen Datenbanken <http://www.pubmed.de>, <http://www.pubmed.com> und <http://www.sponet.de> sowie das Zeitschriftenarchiv der Zweigbibliothek verwendet. Eine wesentliche Quelle bezüglich der Literaturrecherche stellten die „Saarbrücker Ordner“ dar, welche am Lehrstuhl für Sportmedizin der FSU Jena eingesehen werden konnten. Die wichtigste Bezugsquelle relevanter Publikationen wurde allerdings durch einen wissenschaftlichen Mitarbeiter am oben genannten Lehrstuhl in Form einer Literaturliste „Leistungsdiagnostik“ zur Verfügung gestellt. Dieser konnten neben den Originalpublikationen bezüglich der Bestimmung der aerob – anaeroben Schwelle eine Vielzahl weiterer Veröffentlichungen entnommen werden. Aufgrund der letztlich

unüberschaubaren Anzahl von Beiträgen im Zusammenhang mit leistungsdiagnostischen Fragestellungen bestand jedoch die Notwendigkeit, die Arbeit inhaltlich und thematisch stark einzugrenzen. Daraufhin gelangten leistungsdiagnostische Untersuchungen unter Verwendung der Laktatkonzentration in den Blickpunkt. Neben der vertiefenden Betrachtung der Originalpublikationen zur laktatbasierten Bestimmung der aerob – anaeroben Schwelle wurden insbesondere solche Forschungsbeiträge sondiert, welche sich kritisch mit der Thematik der LLD auseinandersetzten. Somit fand im Verlauf der Literaturrecherche und –analyse eine zunehmende Fokussierung auf nachstehende Schwerpunkte statt:

- Vor- und Nachteile fixer und individueller Schwellenkonzepte,
- Transfer der Labor- und Feldtestergebnisse in die Praxis,
- Modellierung biologischer Prozesse sowie
- qualitative Prüfung der bevorzugt angewendeten Schwellenkonzepte.

In Anlehnung an diese zentralen Problemstellungen erfolgte die Formulierung der Arbeitshypothesen. Die oben genannten Schwerpunkte konnten in der Folgezeit sehr umfangreich bearbeitet und dokumentiert werden. Gleichzeitig wurden resultierende Fragestellungen aufgeworfen, die die anschließende Diskussion bereicherten.

Eine weitere wesentliche Zielstellung dieser vorliegenden literaturbasierten Studie sollte darin bestehen, die qualitative Prüfung der vorrangig genutzten Konzepte zur Bestimmung der aerob – anaeroben Schwelle vorzunehmen und diese gegebenenfalls in eine qualitative Rangordnung zu überführen. Dazu wurde ein Großteil der leistungsdiagnostischen Standorte Deutschlands kontaktiert, um die erwünschten Informationen zu erhalten. Aufgrund der geringen Rücklaufquote und der fehlenden Bereitschaft, über das angewendete Schwellenkonzept oder andere Auswertungsmodi zu informieren, war es allerdings nicht möglich, bezüglich der Arbeitshypothese IV (vgl. 2.5) repräsentative Ableitungen zu treffen.

## **3.2 Zentrale Problemstellungen in der LLD – Ergebnisse der Literaturanalyse**

### **3.2.1 Überblick bestehender Schwellenkonzepte**

Um die zentralen Problemstellungen der LLD zu kennzeichnen, erscheint es notwendig, die Vielzahl der entwickelten Schwellenkonzepte zur Bestimmung der

aerob – anaeroben Schwelle kurz vorzustellen und zu charakterisieren. Es soll in diesem Zusammenhang auf die Modelle eingegangen werden, die als zentralen Parameter die Blutlaktatkonzentration verwenden.

Die gemeinsame Zielstellung der aufgeführten Konzepte besteht darin, mit Hilfe kurzer Testverfahren (in der Regel in Form eines Stufentests), das maximale Laktat steady state (maxLass) zu bestimmen beziehungsweise möglichst genau abzuschätzen. Das maxLass repräsentiert in diesem Kontext die Dauerleistungsgrenze und somit jene Belastungsintensität, welche über einen längeren Zeitraum aufrecht erhalten werden kann, ohne dass ein Anstieg der Laktatkonzentration erfolgt. Ein grundlegendes Problem bezüglich der Begrifflichkeiten Dauerleistungsgrenze und Ausdauerleistungsfähigkeit wurde von *Röcker & Dickhuth (1994)* thematisiert. Sie fanden heraus, dass sich die gebräuchlichen Schwellenkonzepte fast ausschließlich für den Bereich der Langzeitausdauer, jedoch nicht für kurzdauernde, hochintensive Belastungen eignen. Somit müsste die Leistung an einer Dauerleistungsgrenze immer relativ zur angestrebten variablen Länge der (Wettkampf-) Leistung angegeben werden. Wenn *Dickhuth et al. (1996)* diesbezüglich formulieren, dass sie die Dauerleistungsgrenze als diejenige maximale Belastungsintensität verstehen, welche mindestens 30 – 90 Minuten durchgehalten werden kann, so untermauern sie damit die oben genannte Problematik. *Mader et al. (1976)* beschrieben den Begriff Dauerleistungsgrenze relativ weit und stellten fest, dass 4 mmol/l Laktat als Beanspruchungslimit von reinen Ausdauerbelastungen über einen Zeitraum von 20 – 60 Minuten anzusehen sind. Da sich die vorliegende Arbeit jedoch vorwiegend mit Problemstellungen im Langzeitausdauerbereich befasst, sollte der Begriff Dauerleistungsgrenze, repräsentiert durch das maxLass, ausreichend genau erfasst sein. Das maxLass wird in diesem Zusammenhang von *Heck (1990a)* als die höchste Belastungsintensität bezeichnet, „bei der Laktatbildung und –elimination im Gleichgewicht stehen oder aber bei der das Laktat in den letzten 20 Minuten der Dauerbelastung um weniger als 1 mmol/l ansteigt.“ (*Heck, 1990a, 32*). In Abb. 2 wird das Verfahren zur Bestimmung des maxLass graphisch dargestellt.

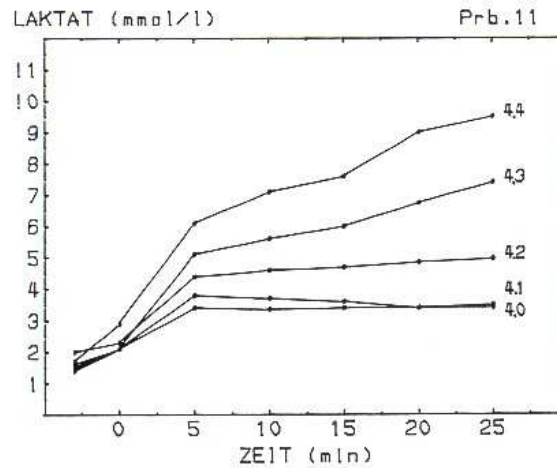


Abb. 2: Bestimmungsverfahren der maxLass – Geschwindigkeit. Die Zahlen an den Kurven repräsentieren die Laufgeschwindigkeiten in m/s (Heck, 1990a).

### 3.2.1.1 „Aerob – anaerobe Schwelle“ nach Mader et al. (1976)

Der Ursprung dieses Konzepts liegt in der Feststellung, dass die meisten in Ausdauersportarten Trainierenden eine Belastungsintensität von 4 mmol/l Blutlaktat über eine längere Zeit noch tolerieren können. Nach Mader et al. (1976) kann der Bereich des Übergangs zwischen der rein aeroben zur partiell anaeroben, laktaziden muskulären Energiestoffwechselleistung in diesem Zusammenhang als „Aerob – anaerobe Schwelle“ der Arbeitsmuskulatur bezeichnet werden. Weiterhin formulierten Mader et al. (1976), dass sich der oben genannte Bereich dann zur Charakterisierung der Ausdauerleistungsfähigkeit eignet, wenn dieser mit dem Maximum der rein aerob abgedeckten energetischen Leistung gleichgesetzt wird (vgl. Abb. 3).

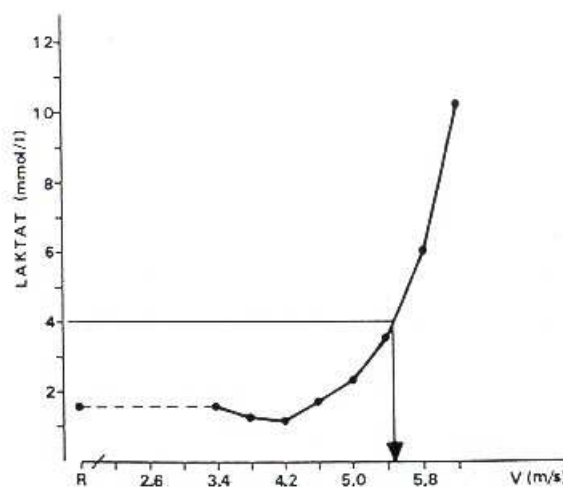


Abb. 3: Bestimmungsverfahren der „Aerob – anaeroben Schwelle“ nach Mader et al. (1976).

### 3.2.1.2 „Anaerobe Schwelle“ nach Kindermann, Simon & Keul (1978)

Kindermann, Simon & Keul (1978) stellten fest, dass die Laufbandgeschwindigkeit, bei der der Energiestoffwechsel ausschließlich durch aerobe Prozesse gedeckt wird und die LLK durch einen signifikanten Anstieg des Laktats gekennzeichnet ist, niedriger als die Laufbandgeschwindigkeit an der aerob – anaeroben Schwelle nach Mader et al. (1976) liegt. Daraufhin erfolgte die Trennung in eine „Aerobe“ (2 mmol/l Laktat) und eine „Anaerobe Schwelle“ (4 mmol/l Laktat). Der Bereich zwischen diesen Schwellen wurde von Kindermann, Simon & Keul (1978) als „Aerob – anaerober Übergang“ bezeichnet.

### 3.2.1.3 „Individuelle anaerobe Schwelle“ nach Keul et al. (1979)

Keul et al. (1979) wiesen darauf hin, dass die fixe Schwelle von 4 mmol/l Laktat, aufgrund genetischer und trainingsbedingter Faktoren, nicht den individuellen Gegebenheiten entspricht. Daraufhin wurde ein Verfahren entwickelt, welches davon ausging, dass der 4 mmol/l – Wert die aerob – anaerobe Schwelle im Mittel korrekt wiedergibt. Vor diesem Hintergrund erfolgte die Berechnung der Tangentenwinkel an 60 LLK bei einem Laktatwert von 4 mmol/l. Dabei ergab sich ein Mittelwert von  $51^{\circ}34'$ , welcher bei Laufbanduntersuchungen einem  $\tan \alpha$  von 1,26 mmol/l/km/h entspricht. Die Bestimmung der „Individuellen anaeroben Schwelle“ (vgl. Abb. 4), welche als Begriff von Keul et al. (1979) in die sportmedizinische Nomenklatur eingeführt wurde, erfolgt demnach bei gleichem Tangentenanstieg der LLK und zeigt eine variable Laktatkonzentration.

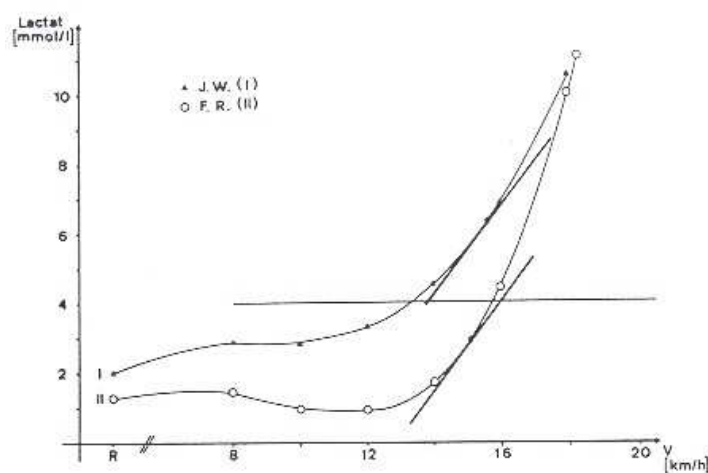


Abb. 4: Bestimmungsverfahren der „Individuellen anaeroben Schwelle“ nach Keul et al. (1979).

#### 3.2.1.4 „Individuelle anaerobe Schwelle“ nach Pessenhofer et al. (1981)

Aufgrund der Nachteile von Belastungswerten beziehungsweise Laufgeschwindigkeiten bei fixen Laktatkonzentrationen zur Steuerung des Ausdauertrainings entwickelten *Pessenhofer, Schwabberger & Schmid (1981)* ein Modell, welches die individuelle Laktatbildungsgeschwindigkeit berücksichtigt. Der individuelle aerob - anaerobe Übergang ist danach durch den Beginn der kontinuierlichen Zunahme der Netto - Laktatbildungsgeschwindigkeit gekennzeichnet. *Pessenhofer, Schwabberger & Schmid (1981)* stellten außerdem fest, dass nach dem Überschreiten des aerob - anaeroben Übergangs die Bildungsgeschwindigkeit zeitproportional zunimmt. Somit kann dieser Zeitpunkt als Grundlage zur Bestimmung der „Individuellen anaeroben Schwelle“ genutzt werden (vgl. Abb. 5).

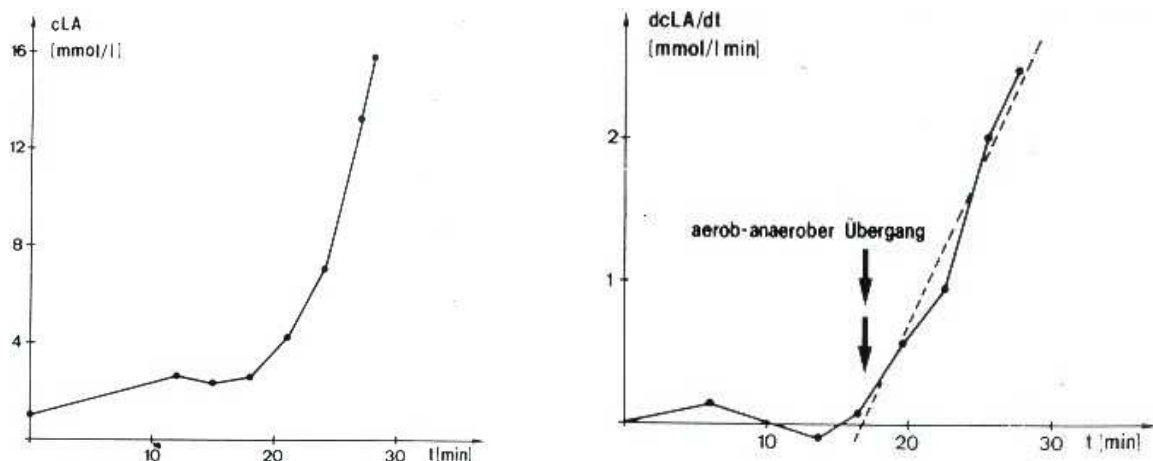


Abb. 5: Bestimmungsverfahren der „Individuellen anaeroben Schwelle“ nach *Pessenhofer, Schwabberger & Schmid (1981)*.

#### 3.2.1.5 „Anaerobe Schwelle“ nach Simon et al. (1981)

Nach *Simon et al. (1981)* kann der Punkt, an dem die größte Änderung der Kurvensteigung der LLK erfolgt, durch den  $\tan \alpha = 1$  und somit durch eine Tangentensteigung von  $45^\circ$ , charakterisiert werden. Da dieser Kurvenpunkt einen Umschlag im Metabolismus signalisiert, ist er nach ihrer Auffassung als „Anaerobe Schwelle“ anzunehmen. Außerdem vermerkten sie in diesem Zusammenhang, dass die in allen Fällen gleiche Laktatzunahmerate für das entwickelte Konzept charakteristisch ist und den wesentlichen Unterschied zu Modellen mit fixen Laktatwerten darstellt. Da dieses Bestimmungsverfahren dem von *Keul et al. (1981)* ähnelt, soll an dieser Stelle auf Abb. 4 verwiesen werden.



### 3.2.1.6 „Individuelle anaerobe Schwelle“ nach Stegmann & Kindermann (1981b)

Nach Stegmann & Kindermann (1981b) ist das Laktatverhalten während Belastung dadurch gekennzeichnet, dass die Eliminationsrate gegen ein Maximum verläuft. Der Zeitpunkt des Gleichgewichts zwischen maximaler Eliminationsrate und Diffusionsrate des Laktats wurde von ihnen als „Individuelle anaerobe Schwelle“ definiert. Zur Bestimmung der Schwelle wird das Verhalten der Laktatkinetik während der Arbeits- und Erholungsphase genutzt. Erreicht die LLK in der Nachbelastungsphase (B) den Abbruchlaktatwert (A), kann mittels Tangente der Schwellenwert (C) bestimmt werden (vgl. Abb. 6). Die Tangentensteigung repräsentiert nach Coen (1997) die maximale Eliminationsrate bei stufenweise ansteigender Belastung.

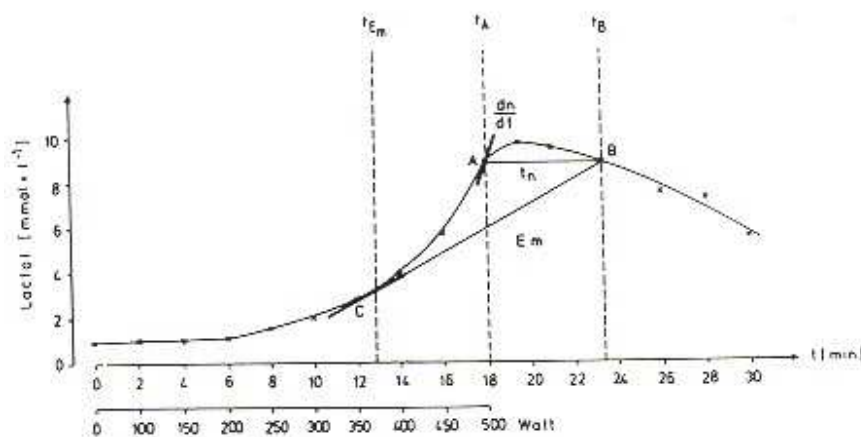


Abb. 6: Bestimmungsverfahren der „Individuellen anaeroben Schwelle“ nach Stegmann & Kindermann (1981b).

### 3.2.1.7 „Individual anaerobic threshold“ nach Bunc et al. (1982)

Bunc et al. (1982) entwickelten ein Verfahren zur Bestimmung der aerob – anaeroben Schwelle, welches den Punkt der LLK bestimmt, an dem sich die Neigung der Laktat – Belastungsfunktion maximal ändert. Dafür wurden von den Autoren im Punkt der niedrigsten Belastung und im Punkt von 15 mmol/l Laktat zwei Tangenten an die durch eine Exponentialfunktion dargestellte LLK angelegt. Die Winkelhalbierende des Schnittpunktes der Tangenten wird auf die LLK übertragen und repräsentiert die „Individual anaerobic threshold“ (vgl. Abb. 7).



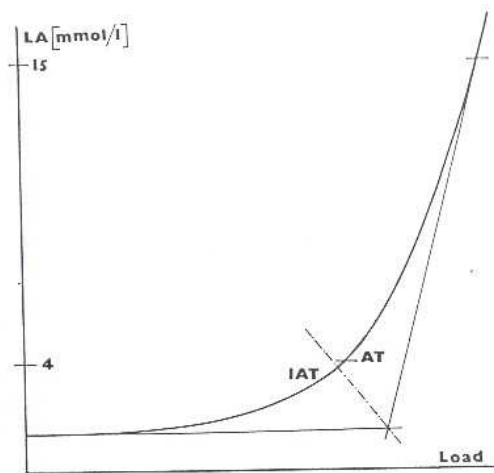


Abb. 7: Bestimmungsverfahren der „Individual anaerobic threshold“ nach *Bunc et al. (1982)*.

### 3.2.1.8 „Individuelle anaerobe Schwelle“ nach *Dickhuth et al. (1988)*

Die Bestimmung der aerob – anaeroben Schwelle nach *Dickhuth et al. (1988)* basiert auf der Idee, dass der Schwellenwert, welcher in einem konstanten Abstand zum minimalen Laktatäquivalent (in der Regel dem Basislaktatwert entsprechend) erhoben wird, variabel auf die Veränderung der Basislaktatkonzentration reagiert. Sie verweisen in diesem Zusammenhang darauf, dass bei der ursprünglich von ihnen gewählten Laufbandcharakteristik und der von ihnen angewandten Belastungsform die „Individuelle anaerobe Schwelle“ durch Addition von 1,5 mmol/l (ausgehend von der Laktatkonzentration am Punkt des minimalen Laktatäquivalents) berechnet werden kann (vgl. Abb. 8).

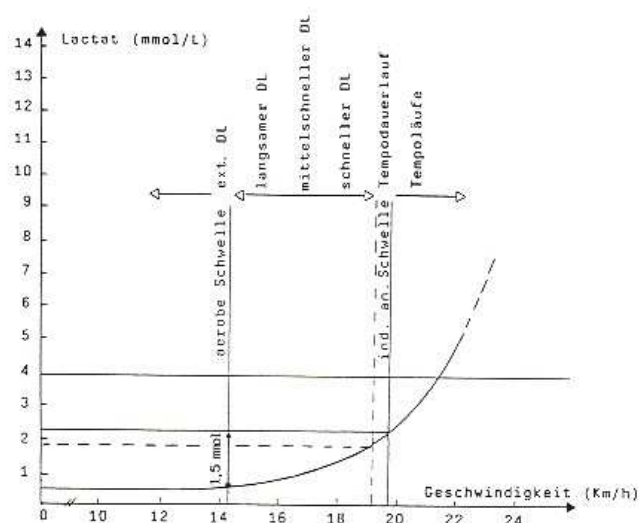


Abb. 8: Bestimmungsverfahren der „Individuellen anaeroben Schwelle“ und abgeleitete Trainingsinhalte nach *Dickhuth et al. (1988)*.

### 3.2.1.9 „Laktatsenke“ nach Griess et al. (1989) und Braumann et al. (1991)

Das Verfahren zur Bestimmung der „Laktatsenke“ (Braumann et al., 1991) wurde erstmals von Griess et al. (1989) vorgestellt. Es handelt sich dabei um eine Methode, welche aus drei Testphasen (Kurzzeitbelastung maximaler Intensität, Pause, Stufentest) besteht. Aufgrund des charakteristischen Verlaufs der LLK wird der Punkt des maxLass an der Stelle bestimmt, an der die Laktat – Leistungs – Beziehung eine Senke aufweist (vgl. Abb. 9). Die Philosophie von Griess et al. (1989) bestand darin, ein Konzept zu entwickeln, welches, unabhängig von den noch weitgehend ungeklärten biochemischen und physiologischen Zusammenhängen von Laktatbildung und –elimination, eine pragmatische Erhebung des maxLass ermöglicht.

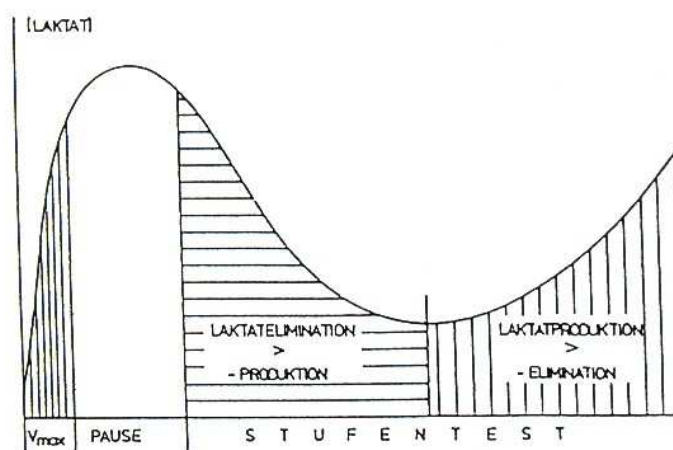


Abb. 9: Bestimmungsverfahren der „Laktatsenke“ nach Braumann et al. (1991).

### 3.2.1.10 „Lactate threshold“ nach Cheng et al. (1992)

Cheng et al. (1992) entwickelten eine Methode, welche ihrer Ansicht nach eine objektive und reliable Möglichkeit zur Bestimmung der „Lactate threshold“ darstellt. In der Umsetzung dieses Verfahrens wurde durch Van Schuylenbergh, Vanden Eynde & Hespel (2004) die LLK zuerst durch ein Polynom dritten Grades gefittet. Anschließend erfolgte die Festlegung einer Geraden, welche durch die Punkte der niedrigsten und höchsten Laktatkonzentration determiniert ist. Durch eine Parallelverschiebung tangiert diese Gerade die LLK an einem Berührungspunkt, welcher die „Lactate threshold“ repräsentiert. Aufgrund der mathematischen Herleitung der Bestimmung der Schwelle wird diese Methode auch „Dmax method“ (Cheng et al., 1992) genannt. Van Schuylenbergh, Vanden Eynde & Hespel (2004) sprechen in diesem Zusammenhang von der „Dmax lactate threshold“, da der Punkt,

welcher diese Schwelle kennzeichnet, an der Stelle des maximalen Abstands zwischen der oben genannten Geraden und der LLK entsteht (vgl. Abb. 10).

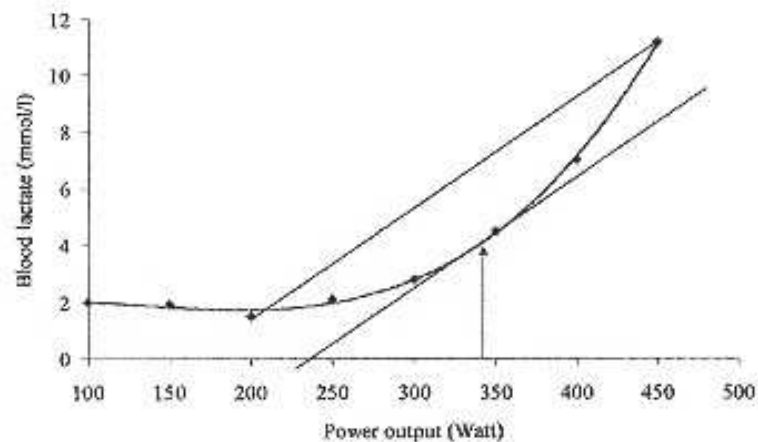


Abb. 10: Bestimmungsverfahren der „Lactate threshold“ mit Hilfe der „Dmax method“ nach Cheng et al. (1992). Abb. aus Van Schuylenbergh, Vanden Eynde & Hespel (2004).

### 3.2.1.11 „Individual anaerobic threshold“ nach Baldari & Guidetti (2000)

Ein weiteres Verfahren zur Bestimmung des maxLass mit Hilfe der aerob – anaeroben Schwelle konnte von Baldari & Guidetti (2000) vorgestellt werden. Sie legten die „Individual anaerobic threshold“ mittels Erhebung zweier LLK fest. Als „Individual anaerobic threshold ( $IAT_m$ )“ wird dabei jene Schwelle bezeichnet, bei der eine direkte Zuordnung von Belastungswert und dem am Ende der Belastungsstufe abgenommenen Laktatwert erfolgte. Die Festlegung des dazugehörigen Schwellenwertes entsteht an der Stelle der LLK, an der ein Laktatwert, welcher aus einem Laktatanstieg zum vorhergehenden Wert von  $\geq 0,5$  mmol/l resultiert, gemessen werden kann („ $IAT_m$ “). Wird dieser Laktatwert der unmittelbar vorausgehenden Belastungsstufe zugeordnet, so wird er mit „ $IAT_a$ “ bezeichnet. Nach Ansicht der Autoren repräsentiert dieser Schwellenwert das maxLass. Die beiden Bestimmungsverfahren und ihre Validierung mittels Dauertest können Abb. 11 entnommen werden.

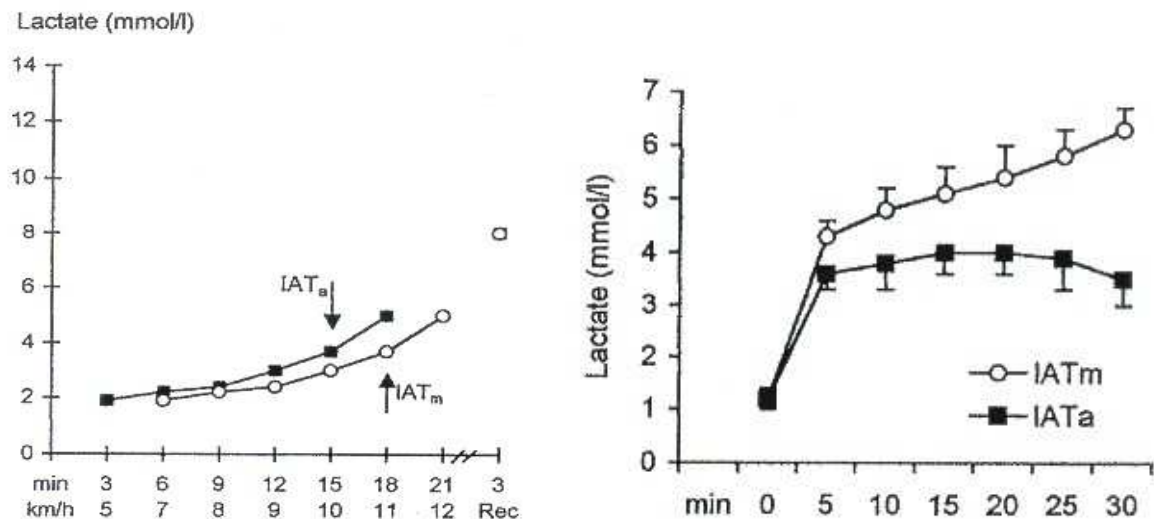


Abb. 11: Bestimmungsverfahren der „Individual anaerobic threshold“ nach *Baldari & Guidetti (2000)* und LLK während 30minütiger Dauerbelastung mit den Schwellenleistungen „IAT<sub>m</sub>“ und „IAT<sub>a</sub>“.

### 3.2.2 Fixe und individuelle Schwellenkonzepte im wissenschaftlichen Diskurs

Bevor auf die eigentliche Problemstellung eingegangen werden soll, erscheint es sinnvoll, die ursprünglichen Intentionen der Entwicklung von Schwellenkonzepten näher zu beleuchten. Ein wichtiger Gesichtspunkt in diesem Kontext ist, dass die anaerobe Schwelle als ein verlässliches Kriterium zur Einschätzung der Ausdauerleistungsfähigkeit gilt. Somit stellt sie ein besseres Maß zur Beurteilung der aeroben Kapazität dar als die unter maximalen Bedingungen ermittelten Leistungsparameter (*Kindermann, 1984*). Weiterhin führt *Kindermann (1985)* an, dass der erhobene submaximale Parameter anaerobe Schwelle weniger von der individuellen Motivation und vom Anteil der Glykolyse an der Gesamtenergiebereitstellung beeinflusst wird. *Keul, Kindermann & Simon (1978)* verweisen außerdem darauf, dass die Bestimmung des aeroben und anaeroben Schwellenwertes deshalb Bedeutung erlangt hat, weil sich trotz Zunahme der Leistungsfähigkeit das Herzzeitvolumen beziehungsweise das Herzvolumen nicht wesentlich von den Werten der Spitzenathleten früherer Jahre unterschied. Somit müssen nach ihrer Auffassung metabolische Vorgänge in der Muskelzelle für die Leistungsunterschiede verantwortlich sein. *Kindermann (1985)* argumentiert ähnlich, indem er feststellt, dass die heutigen Spitzenathleten keine größeren Herzen und keine höheren maximalen Sauerstoffaufnahmewerte aufweisen als vergleichbare Athleten vor 10 oder 20 Jahren. Auch wenn die von *Kindermann (1985)* und *Keul, Kindermann & Simon (1978)* beobachteten Phänomene über zwei Jahrzehnte zurück

liegen, können diese durch die Analyse der Leistungsentwicklung im internationalen Spitzensport bekräftigt werden. Auch *Tschopp et al. (2001)* bestätigen den angesprochenen Sachverhalt, indem sie berichten, dass die  $\text{VO}_2\text{max}$  – Werte sowohl bei Trainierten als auch Untrainierten schlechter mit Wettkampfleistungen von 3 – 42 km korrelieren als die Leistung bei einer fixen Laktatkonzentration beziehungsweise einer anaeroben Schwellenleistung. *Kindermann (1985)* verweist in diesem Zusammenhang darauf, dass die Zunahme der sportartspezifischen Leistungsfähigkeit ein Indiz dafür ist, „dass die aerobe metabolische Kapazität auf der Ebene der Skelettmuskelzelle zugenommen hat [...], was allein durch die Messung der maximalen Sauerstoffaufnahme nicht erfasst werden kann.“ (*Kindermann, 1985, 69*). Ein weiterer wichtiger Grund für die Anwendung submaximaler Parameter basiert auf der Notwendigkeit, aussagekräftige und verhältnismäßig einfach einsetzbare Parameter zu entwickeln, die es ermöglichen, den aktuellen Leistungsstand empfindlicher anzuzeigen als maximale Kenngrößen (*Coen, 1997*). Bei wiederholten leistungsdiagnostischen Untersuchungen können Verschiebungen der LLK Veränderungen der Leistungsfähigkeit exakt objektivieren, ohne dass eine maximale Ausbelastung vorliegen muss (*Kindermann, 1985*).

Um nachfolgend den umfangreichen wissenschaftlichen Diskurs, welcher im Zusammenhang mit den entwickelten Schwellenkonzepten stattfand beziehungsweise stattfindet, darzustellen, ist es vorerst notwendig, die Begriffe *Fixe Schwelle* und *Individuelle (anaerobe) Schwelle* voneinander abzugrenzen. Eine fixe Schwelle wird durch eine Belastung (Geschwindigkeit, Leistung, Zeit) gekennzeichnet, bei der ein bestimmter Laktatwert erreicht wird. Fixe Schwellen werden somit über den Laktatwert definiert und sind im zugehörigen Leistungs-, Geschwindigkeits- oder Zeitparameter variabel. Sie sind bei vorliegender LLK relativ einfach bestimmbar. Die Veröffentlichung von *Mader et al. (1976)* stellt bezüglich der fixen, laktatbasierten Schwellenkonzepte die Primärquelle dar. Individuelle Schwellen zeigen im Gegensatz zu fixen Schwellen neben der Variabilität der individuellen Leistung auch eine unterschiedliche, vom Probanden abhängige Höhe des Schwellenlaktatwertes. Der Begriff individuelle anaerobe Schwelle (IAS) wurde in diesem Kontext erstmals von *Keul et al. (1979)* verwendet und ist seitdem fester Bestandteil in der Terminologie der LLD. Nach *Kindermann (1985)* wird die IAS als die Belastungsintensität bezeichnet, bei der sich ein Gleichgewicht zwischen

Laktatbildung und Laktatelimination einstellt. Weiterhin repräsentiert die IAS das maxLass, wonach jede höhere Intensität zu einem allmählichen Anstieg der Laktatkonzentration während konstanter Belastung führt (Coen, 1997).

Wie unter 2.2 beschrieben, können *Mader et al. (1976)* „als Begründer des Laktat – Schwellenkonzepts in der Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung angesehen werden.“ (Heck, 2004, 271). Es wurde in diesem Zusammenhang festgestellt, dass bei einem Laktatwert von 4 mmol/l eine Belastungsintensität erreicht wird, die die meisten in Ausdauersportarten Trainierenden in Form einer Ausdauerbelastung über eine längere Zeit noch tolerieren können. Dieser Bereich eignet sich nach *Mader et al. (1976)* zur Charakterisierung der Ausdauerleistungsfähigkeit, wenn man das Maximum der rein aerob abgedeckten Stoffwechselleistung mit dieser gleichsetzt. Weiterhin wurde darauf hingewiesen, dass die Arbeitsdauer von vier Minuten je Belastungsstufe nicht unterschritten beziehungsweise eine Dauer von fünf bis zehn Minuten gewählt werden sollte. Die von *Mader et al. (1976)* aufgestellten Empfehlungen zur Trainingssteuerung anhand der Ergebnisse der LLD zeigten jedoch folgende Problematik: Nur gering ausdauertrainierte Probanden konnten die abgeleiteten Intensitätsbereiche tolerieren, hoch ausdauertrainierte Athleten waren dagegen zu stark belastet (Heck, 2001). *Tschopp et al. (2001)* formulierten diesbezüglich, dass die fixe 4 mmol/l – Schwelle die effektive anaerobe Schwelle unter Umständen unter- oder überschätzen kann. Außerdem machten *Pessenhofer, Schwabberger & Schmid (1981)* darauf aufmerksam, dass die auf fixen Laktatkonzentrationen basierenden Konzepte keine Rücksicht auf individuelle Unterschiede im Muskelstoffwechsel und in der Laktatkinetik nehmen, und diese somit im Einzelfall zu einer falschen Leistungsbeurteilung führen können. Diese praxisbezogenen Problemstellungen führten in der Folge dazu, dass zahlreiche Konzepte (*Baldari & Guidetti, 2000; Braumann et al., 1991; Bunc et al., 1982; Cheng et al., 1992; Dickhuth et al., 1988; Griess et al., 1989; Kindermann, Simon & Keul, 1978; Keul et al., 1979; Pessenhofer, Schwabberger & Schmid, 1981; Simon, et al., 1981; Sjödin & Jacobs, 1981; Stegmann, Kindermann & Schnabel, 1981a*) zur Bestimmung der aerob – anaeroben Schwelle entstanden (Heck, 2001; *Tschopp et al., 2001*). Um mögliche Interpretationsschwierigkeiten beziehungsweise –fehler zu beseitigen, verwiesen *Heck, Hess & Mader (1985a)* darauf, dass *Mader et al. (1976)* die Schwelle für die Laufbandergometrie definiert haben, und eine Übertragung auf



andere Belastungsarten nicht ohne weiteres möglich ist. Nur wenn entsprechende Untersuchungen belegen, dass ein bestimmter Laktat- oder Tangentenwert oder ein anderes Bestimmungsverfahren das maxLass im Mittel wiedergeben, kann nach *Heck, Hess & Mader (1985a)* der oben genannte Transfer stattfinden.

Der eigentliche wissenschaftliche Diskurs bezüglich der Anwendung der verschiedenen Schwellenkonzepte basiert auf der zentralen Fragestellung, in wie weit das jeweilige Konzept in der Lage ist, das maxLass zu bestimmen und eine praktikable Trainingsteuerung zu ermöglichen. Unter analytischer Betrachtung der bestehenden nationalen und internationalen Literatur, welche sich mit der Thematik laktatbasierter leistungsdiagnostischer Untersuchungen auseinandersetzt, sind verschiedene Diskussionsschwerpunkte zu erkennen. Einerseits wird versucht die Entwicklung individueller Schwellenkonzepte zu legitimieren, indem die Vorteile gegenüber der LLD mit fixen Laktatwerten dargestellt werden. Andererseits ist auffällig, dass verschiedene Arbeitskreise darum bemüht sind, das eigene Konzept zur Bestimmung der aerob – anaeroben Schwelle bezüglich seiner Aussagekraft und Gültigkeit hervorzuheben. *Heck & Roszkopf (1994)* sprechen in diesem Zusammenhang vom Bemühen, „das «eigene» Schwellenkonzept als die «wahre Schwelle» zu beweisen.“ (*Heck & Roszkopf, 1994, 127*). Den dritten Schwerpunkt im wissenschaftlichen Diskurs repräsentieren jene Autoren beziehungsweise Arbeitsgruppen, welche der LLD und den resultierenden Ableitungen für die Trainingssteuerung im Allgemeinen sehr kritisch gegenüberstehen.

Bezogen auf die Überlegenheit individueller Konzepte formulierten *Schmidt et al. (1993)*, dass diese, gegenüber Schwellenkonzepten mit starren Laktatwerten, deutliche Vorteile, aufgrund der geringeren Störanfälligkeit bezüglich äußerer Einflüsse, aufweisen. Deshalb erscheinen die individuellen Schwellenbestimmungen für die Leistungsdiagnostik und Trainingsberatung besser geeignet. Weiterhin zeigen verschiedene Beiträge die Abhängigkeit der Schwellenkonzepte und der erhaltenen Ergebnisse der LLD von der Laktatkinetik und somit von der Dynamik der Laktat – Leistungs - Beziehung (*Fröhlich et al., 1989; Keul et al., 1979; Kindermann, 1984, 1985; Pessenhofer, Schwaberg & Schmid, 1981*). Es wird in diesem Zusammenhang darauf verwiesen, dass Schwellenkonzepte mit fixen Laktatwerten die individuelle Laktatkinetik unberücksichtigt lassen. Dadurch können im Einzelfall Fehlbeurteilungen bezüglich der Ableitungen für die Trainingssteuerung resultieren.

Außerdem kann dies die Steuerung des intensiven und extensiven Ausdauertrainings beeinträchtigen (*Kindermann, 1984*). *Fröhlich et al. (1989)* beschreiben einen weiteren Vorteil individueller anaerober Schwellen und berichten, dass unterschiedliche muskuläre Glykogenvorräte ohne Einfluss auf individuell bestimmte anaerobe Schwellen und daraus abgeleitete Trainingsempfehlungen sind. Auch *Busse et al. (1987)* untersuchten die Problematik der Glykogenverarmung in der Arbeitsmuskulatur. Im Resultat erkannten sie, dass durch eine Glykogenverarmungskurve mit deutlicher Rechtsverschiebung der LLK die 4 mmol/l – Schwelle folglich überschätzt wird. Damit erscheint die Interpretation einer solchen LLK im Sinne einer verbesserten Ausdauerfähigkeit fehlgeleitet.

An dieser Stelle soll auch darauf hingewiesen werden, dass neben dem wissenschaftlichen Diskurs fixe vs. individuelle Schwelle, auch Beiträge existieren, welche die verschiedenen individuellen Schwellenkonzepte gegeneinander prüfen. So stellen *Baldari & Guidetti (2000)* fest, dass die von ihnen entwickelte Methode zur Bestimmung der aerob – anaeroben Schwelle zwei wesentliche Vorteile gegenüber der Bestimmungsmethode von *Stegmann & Kindermann (1981b)* aufweist. Einerseits ist dies die relativ einfache, visuelle Bestimmung der Schwelle im Vergleich zur computergestützten Auswertung. Andererseits scheint die Übertragung des gemessenen Laktatwertes auf die vorhergehende Belastungsstufe der Laktatkinetik eher zu entsprechen. Der Grund wird darin gesehen, dass bei dreiminütiger Stufendauer am Ende der jeweiligen Belastungsstufe keine steady – state – Verhältnisse der Blutlaktatkonzentration vorherrschen.

Um einen weiteren Schwerpunkt im wissenschaftlichen Diskurs zu kennzeichnen, soll an dieser Stelle in erster Linie auf die Arbeiten und Beiträge der Arbeitsgruppe um *Heck* verwiesen werden (*Heck, Hess & Mader, 1985a; Heck, 1990a, 1990b; Heck & Roszkopf, 1994*). Diese Forschungsarbeiten beschäftigen sich vorrangig kritisch mit der Bestimmung der aerob – anaeroben Schwelle, ergo mit den Grenzen der existierenden Schwellenkonzepte. Diese wurden von *Heck, Hess & Mader (1985a)* relativ drastisch formuliert, indem sie konstatierten, dass keine Schwelle, weder fix noch individuell, in der Lage ist, eine punktgenaue Trainingssteuerung zu ermöglichen. *Heck & Roszkopf (1994)* konnten diesbezüglich feststellen, dass einerseits die individuellen anaeroben Schwellen das maxLass nicht besser repräsentieren als die fixe 4 mmol/l – Schwelle und andererseits keine empirische



Basis für ein maxLass – orientiertes beziehungsweise schwelengesteuertes Training besteht. Sie empfehlen vor diesem Hintergrund, „alle Schwellenkonzepte bezogen auf die Trainingssteuerung aufzugeben.“ (Heck & Roskopf, 1994, 127).

### **3.2.3 Abhängigkeit der Schwellenbestimmung von beeinflussenden Kriterien**

Nachdem im Verlauf der bisherigen Literaturanalyse die entwickelten Schwellenkonzepte und der wissenschaftliche Diskurs im Zusammenhang mit der Anwendung der Modelle beleuchtet worden sind, soll an dieser Stelle auf verschiedene Kriterien eingegangen werden, welche die Bestimmung der aerob – anaeroben Schwelle beeinflussen. Der Unterschied zu den grundlegenden Standardisierungsmaßnahmen (vgl. Abschnitt 3.2.6) besteht darin, dass nur mittels der nachfolgend aufgeführten Kriterien die Möglichkeit besteht, die verschiedenen Konzepte gegeneinander zu prüfen, das heißt Stärken und Schwächen der einzelnen Schwellenmodelle aufzuzeigen. Die grundlegenden Standardisierungsmaßnahmen besitzen dagegen eine Art Basisfunktion und sollen die hohe Qualität der Ergebnisse der LLD generell sichern. Sie ermöglichen eine genaue Abbildung der physiologischen Reaktion mittels LLK und simulieren die Verhältnisse aus der Praxis.

#### **3.2.3.1 Kriterium „Belastungsschema / Testdesign“**

Das Kriterium „Belastungsschema / Testdesign“ bezieht sich auf den eigentlichen Vollzug der leistungsdiagnostischen Untersuchung. Da die Konzepte zur Bestimmung der aerob – anaeroben Schwelle in der Regel auf der Durchführung einer stufenförmigen Belastung basieren, sind in diesem Zusammenhang folgende Parameter von wesentlicher Bedeutung: die Stufenhöhe (Inkrement), die Stufendauer und die resultierende Belastungsanstiegsgeschwindigkeit (BAG).

Schon Mader et al. (1976) erkannten, dass bei zu kurzen Belastungsstufen, welche bei ca. zwei Minuten im Bereich des Übergangs zum stationären Zustand liegen, ein zunehmender Anteil des Energiebedarfs anaerob – laktacid gedeckt wird und somit die Ausdauerleistungsfähigkeit nicht bestimmt werden kann. Ein aerobes Energiegleichgewicht kann ihrer Meinung nach nur dann erreicht werden, wenn die Arbeitsdauer vier Minuten nicht unterschreitet beziehungsweise besser eine Stufenlänge von fünf bis zehn Minuten gewählt wird. Um die Anwendung

verschiedener Schwellenkonzepte zu validieren, wurden von *Heck, Hess & Mader (1985a)* Untersuchungen durchgeführt, bei denen die Abhängigkeit der Schwellenwerte von der Stufendauer zum Ausdruck kommt. Sie zeigten, dass der mittlere Schwellenlaktatwert (bezogen auf die maxLass – Geschwindigkeit) bei Laufbandbelastungen mit fünfminütiger Stufendauer 4,0 mmol/l dagegen bei dreiminütiger Stufendauer nur 3,5 mmol/l beträgt (vgl. Abb. 12). Bei der üblicherweise angewandten Fahrradergometrie mit einer BAG von 50 W je 3 min Stufendauer (16,67 W/min) kommt es nach *Heck (1990b)* zu einer Verschiebung des maxLass auf eine mittlere Laktatkonzentration von 3 mmol/l.

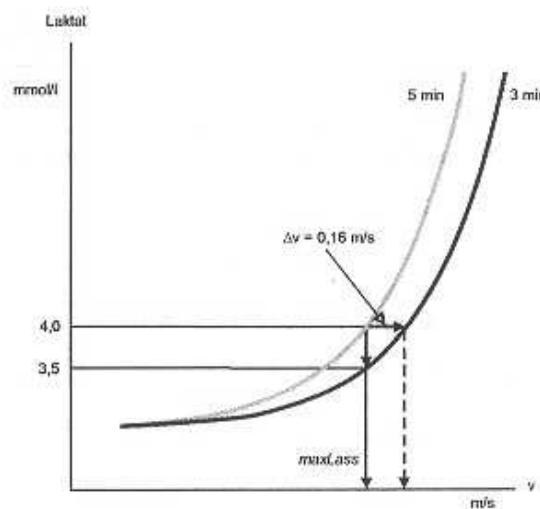


Abb. 12: LLK während der Laufbandergometrie. Dargestellt sind die Verschiebung der aerob – anaeroben Schwelle nach *Mader et al. (1976)* um 0,16 m/s nach rechts sowie die Änderung des Schwellenlaktatwertes von 4 auf 3,5 mmol/l Laktat bei Verkürzung der Stufendauer von 5 auf 3 min (*De Marées, 2003*).

Weiterhin verweisen *Heck, Hess & Mader (1985a)* darauf, dass sich, aufgrund der Laktatkinetik, die Schwellenwerte nach *Mader, Keul* und *Bunc* nach rechts zu höheren Belastungen beziehungsweise Geschwindigkeiten verschieben. Die Ursache dafür ist in der Abhängigkeit der Laktatkonzentration von der Zeit zu sehen. Außerdem ist die Zeitkonstante des Laktatanstiegs von der Höhe des steady state Laktats abhängig. In diesem Zusammenhang vermerkt *Heck (1990b)*, dass im Mittel für ein Laktat steady state (Lass) von 2 mmol/l bei einer Stufendauer von 3 beziehungsweise 2 min nur etwa 78 beziehungsweise 63 % des Laktats akkumulieren. Daraus würde nach *Heck (1990a)* eine Belastungsdauer von 6 min resultieren, wenn 95 % des Endwertes 2 mmol/l Laktat erreicht werden sollen. Für

ein Lass von 4 mmol/l wäre sogar eine Stufenlänge von 9 min notwendig (vgl. Abb. 13).

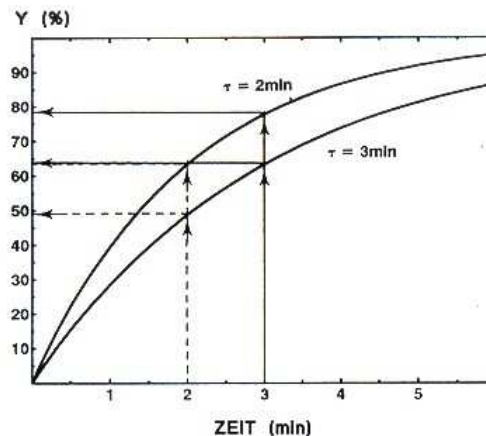


Abb. 13: Laktatkinetik für zwei verschiedene Zeitkonstanten.  $T = 2 \text{ min}$  repräsentiert die Verhältnisse bei einem Lass von 2 mmol/l und  $\tau = 3 \text{ min}$  die Verhältnisse bei einem Lass von 4 mmol/l Laktat (Heck, 1990b).

Für die *Stegmann* – Schwelle ist nach Befunden von Heck, Hess & Mader (1985a) im Bereich einer BAG von 0,08 – 0,13 m/s/min keine Abhängigkeit zu erkennen. Ähnliche Untersuchungsergebnisse wurden von Stegmann & Kindermann (1981b) für die Fahrradergometrie präsentiert. Dabei konnten sie feststellen, dass die anaerobe Schwelle bei einer fixen Laktatkonzentration von 4 mmol/l eine Abhängigkeit von der BAG aufweist und mit zunehmender Stufendauer die Leistungsfähigkeit im Bereich dieser Schwelle abnimmt. Außerdem wurde nachgewiesen, dass diese Abhängigkeit bei der Bestimmung der individuellen anaeroben Schwelle nach Stegmann, Kindermann & Schnabel (1981a) nicht besteht. Dagegen konnten Untersuchungen von Heck (1990a) zeigen, dass bei der Fahrradergometrie alle Schwellen eine Abhängigkeit von der BAG aufweisen und bei einem stufenförmigen Belastungsanstieg von 25W/2min kein Schwellenkonzept in der Lage ist, das maxLass annähernd korrekt abzuschätzen. Außerdem liegen die Schwellenwerte nach Mader, Keul und Bunc in einem Bereich von 6 – 25 W/min über den erhobenen maxLass – Werten. Die *Stegmann* – Schwelle zeigte nur bei einer BAG von 25 W/min eine Übereinstimmung mit der maxLass – Leistung (vgl. Abb. 14).

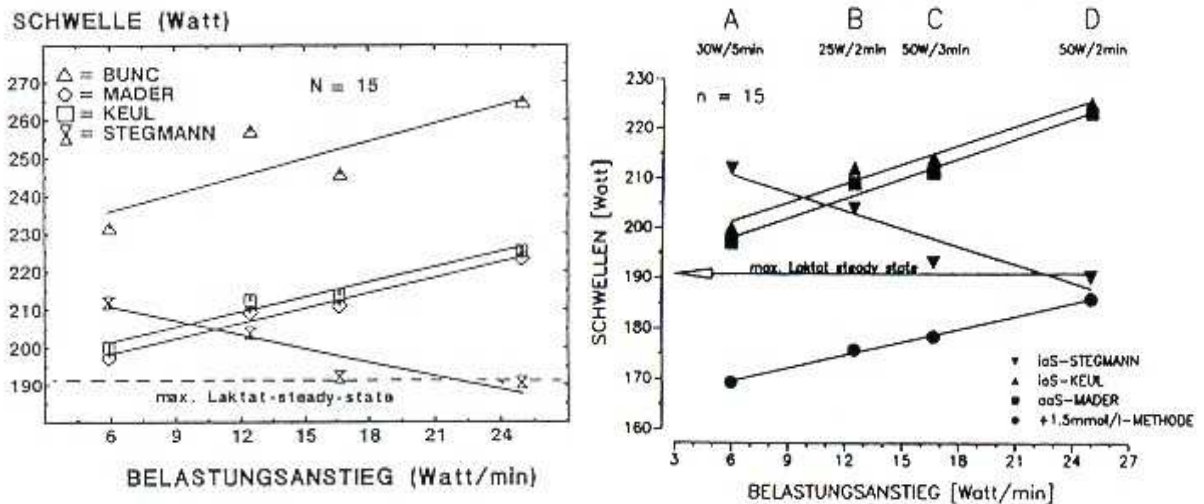


Abb. 14: Abhängigkeit der Schwellenwerte nach Mader et al. (1976), Keul et al. (1979), Stegmann, Kindermann & Schnabel (1981a), Bunc et al. (1982) und Dickhuth et al. (1988) vom Belastungsanstieg. Abb. aus Heck (1990b) sowie Heck & Schulz (1999).

Da nach Heck (1990a) somit der Einfluss des Testprotokolls auf das Laktatverhalten und auf die Ergebnisse der LLD deutlich wird, ist seine Forderung nach der Korrektur der erhobenen Schwellenwerte in Abhängigkeit von der BAG, nachzuvollziehen. In diesem Zusammenhang legte Heck (1990a) Empfehlungen vor, wonach eine Modifizierung der Mader - und Keul - Schwelle möglich ist. Bei den häufig angewendeten Testschemata 25/25/2 sowie 50/50/3 muss laut der Untersuchungsergebnisse von Heck (1990a) der maxLass - bezogene Schwellenwert für das Mader - Konzept von 4 mmol/l auf ca. 3 mmol/l und für das Keul - Modell von  $\tan \alpha = 0,0549 \text{ mmol/l/W}$  auf  $\tan \alpha = 0,04 \text{ mmol/l/W}$  modifiziert werden.

Abschließend soll an dieser Stelle auf Heck & Hollmann (1999) verwiesen werden, welche zusammenfassend feststellten, „dass ohne Standardisierung der Belastungsschemata die Normierung von Testkriterien kaum möglich sein wird.“ (Heck & Hollmann, 1999, 70). Ihrer Auffassung folgend dürfte eine derartig hohe Standardisierung in der nahen Zukunft nicht zu erwarten sein.

### 3.2.3.2 Kriterium „Ernährung / Glykogenspeicher“

Von wesentlicher Bedeutung im Zusammenhang mit dem Kriterium „Ernährung / Glykogenspeicher“ ist die Beobachtung von Braumann, Busse & Maassen (1987),

wonach der intrazellulär verfügbare Substratspeicher Glykogen einen ganz wesentlichen Einfluss auf die Höhe der Milchsäuerkonzentration unter Belastung hat. Weiterhin stellten sie diesbezüglich fest, dass die Milchsäure als essentielles Zwischenprodukt des Glucoseabbaus unter Belastung nur dann ansteigen kann, wenn Glucose beziehungsweise Glykogen in ausreichender Menge verfügbar ist. Nach *Braumann, Busse & Maassen (1987)* kann durch die Reduktion der Muskelglykogenkonzentration die LLK nach rechts verschoben sein und damit eine deutlich verbesserte Ausdauerleistungsfähigkeit bei Nutzung fixer Laktatschwellenkonzepte vorgetäuscht werden. In Abb. 15 wird diese Abhängigkeit dargestellt. *Busse et al. (1987)* sprechen in diesem Zusammenhang von leistungsphysiologischem Wohlergehen, wenn eine Rechtsverschiebung der LLK mit einer Verbesserung der Dauerleistungsfähigkeit unkritisch interpretiert wird. Aus diesem Grund lautet ihre Botschaft, dass das Blutlaktat entgegen langjähriger Praxis kein relevantes Kriterium der Ausdauerfähigkeit darstellt. Nach Ansicht von *Busse et al. (1987)* hat jedoch die Laktatmessung, obwohl die Blutlaktatkonzentration im Stufentest nicht als valide ausdauerspezifische Testgröße genutzt werden kann, durch ihre Funktion als Repräsentant der Muskelglykogengehalts eher gewonnen als verloren.

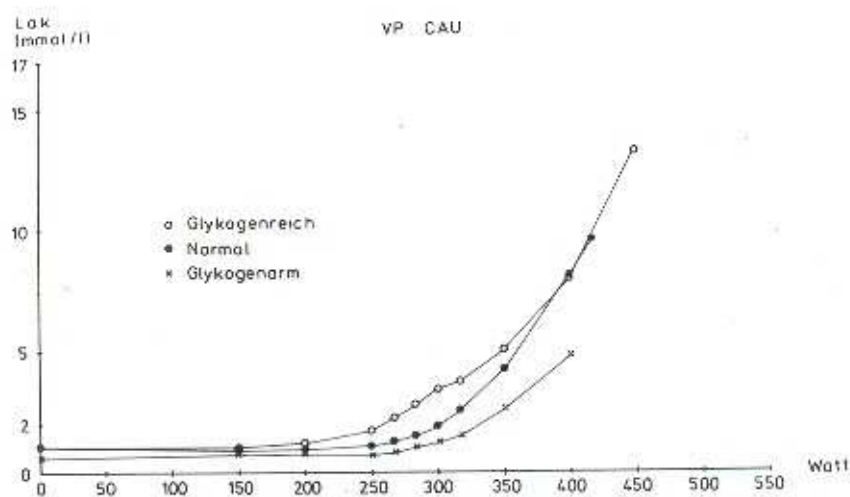


Abb. 15: Einfluss unterschiedlicher Ernährungssituationen auf Form und Lage der LLK im Einzelfall (*Braumann, Busse & Maassen, 1987*).

Die Notwendigkeit, weitere Parameter in der LD zur Validierung der aerob – anaeroben Schwelle zu nutzen, begründen *Weicker & Braumann (1994)* ebenfalls damit, dass durch eine Rechtsverschiebung des Schwellenbereiches und durch den

flacheren Anstieg der LLK bei verminderter Laktatproduktion die Aussagekraft des Parameters Laktat deutlich eingeschränkt wird. Auch diese Autoren verweisen darauf, dass die Gefahr besteht, durch eine Rechtsverschiebung und Abflachung der LLK, eine erhöhte Ausdauerleistungsfähigkeit zu diagnostizieren. Außerdem bestätigen *Tschopp et al. (2001)* die Gefahr der Überschätzung der Dauerleistungsgrenze durch eine verminderte Laktatproduktion. Allerdings besteht diese Abhängigkeit nur für Schwellenleistungen, welche mit Hilfe fixer Laktatwerte erhoben wurden (vgl. Abb. 15). Um dieser Problemstellung pragmatisch zu begegnen, empfehlen *Tschopp et al. (2001)*, die Faktoren, die ein Testresultat signifikant beeinflussen können, jedes Mal zu erfragen und zu dokumentieren. *Fröhlich et al. (1989)* führten Untersuchungen durch, bei denen die Zielstellung darin bestand, den Einfluss von kohlenhydratreicher und kohlenhydratarmer Kost auf die Ausdauerleistungsfähigkeit zu überprüfen. Dabei beurteilten sie sowohl die Abhängigkeit der fixen 4 mmol/l – Schwelle als auch die Abhängigkeit der IAS nach *Stegmann, Kindermann & Schnabel (1981a)* vom Glykogengehalt in der Muskulatur. Dabei konnte festgestellt werden, dass sowohl die Leistung als auch die Herzfrequenz an der fixen Laktatschwelle bei kohlenhydratarmer Kost signifikant ( $p < 0,01$ ) höher lagen im Vergleich zur kohlenhydratreichen Ernährung. Dagegen waren die IAS – Leistung und die IAS – Herzfrequenz unverändert, der Laktatspiegel lag jedoch um 31 % deutlich und signifikant niedriger. *Fröhlich et al. (1989)* führen dies auf eine ordinatenparallele Rechtsverschiebung der LLK zurück, ohne dass sich der Zeitpunkt des überproportionalen Laktatanstiegs ändert (vgl. Abb. 16). Somit scheint die Bestimmung der individuellen anaeroben Schwelle nach *Stegmann, Kindermann & Schnabel (1981a)* relativ unabhängig gegenüber dem Einfluss des Kohlenhydratgehalts der Nahrung und gegenüber unterschiedlicher muskulärer Glykogenvorräte zu sein.

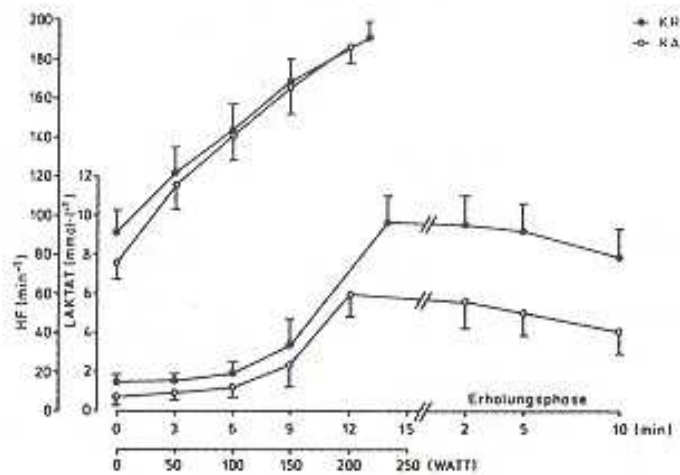


Abb. 16: LLK und Herzfrequenzverlauf weiblicher Probanden ( $n = 8$ ) während stufenweise ansteigender Belastung bei kohlenhydratarmer und kohlenhydratreicher Ernährung (Fröhlich et al., 1989).

Zusammenfassend soll an dieser Stelle auf *Kindermann (1989)* verwiesen werden, nach dem eine Beeinflussung der LLK durch unterschiedliche Glykogenvorräte nicht generell gegen das Verfahren der LLD spricht, da andere Tests ebenfalls Einflussfaktoren haben und standardisierte Bedingungen erfordern. Ähnlich argumentierten auch *Braumann, Busse & Maassen (1987)* und stellten fest, dass mit etwas mehr Hintergrundwissen über das Zustandekommen der LLK und unter höchstmöglicher Standardisierung der Testbedingungen durchaus Verlaufsbeobachtungen möglich sind. Diese erlauben ihrer Ansicht nach über eine Lageverschiebung der LLK recht konkrete Aussagen bezüglich der Effizienz einer durchgeführten Trainingsperiode und mit einiger Erfahrung auch die Vorgabe grober Trainingsintensitäten.

### 3.2.3.3 Kriterium „Vorbelastung“

Auch für das Kriterium „Vorbelastung“ kann ein Einfluss auf den Verlauf der LLK nachgewiesen werden. *Braumann, Busse & Maassen (1987)* vermerkten diesbezüglich, dass durch ein vor einem Test durchgeführtes Training die LLK nach rechts verschoben sein kann und somit eine verbesserte Ausdauerleistung bei fixen Laktatkonzentrationen vorgetäuscht wird (vgl. Abb. 17). In Folge dieser Fehleinschätzung besteht ihrer Meinung nach die Gefahr, dass einem durch Vorbelastung glykogenverarmten Sportler Trainingsintensitäten empfohlen werden,



die ihn innerhalb kurzer Zeit in einen Erschöpfungs- beziehungsweise Übertrainingszustand führen. Erneut deutet sich die Unmöglichkeit einer exakten Trainingssteuerung durch die alleinige Nutzung und Interpretation der LLK an.

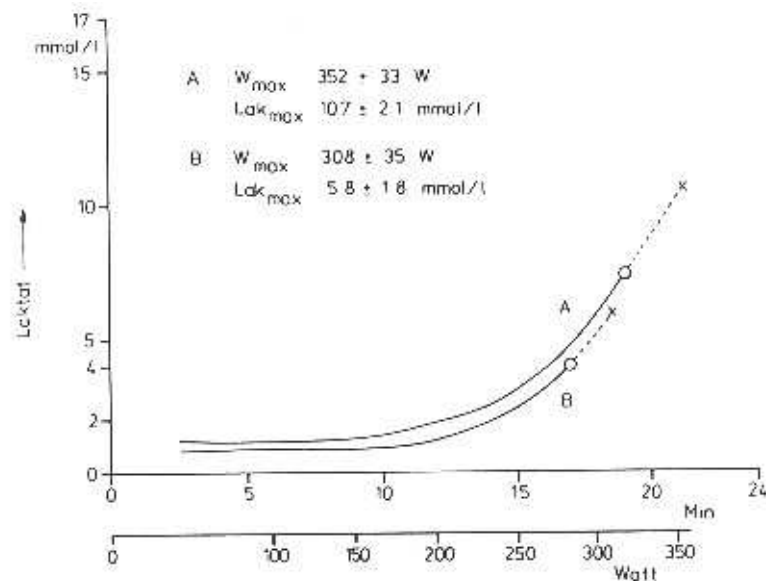


Abb. 17: LLK von acht Probanden bei stufenförmiger Fahrradergometrie. LLK A repräsentiert die Verhältnisse ohne Vorbelastung in normalem Ernährungszustand und LLK B die Verhältnisse mit Vorbelastung und einhergehender muskulärer Glykogenverarmung (Braumann, Busse & Maassen, 1987).

Auch Tschopp et al. (2001) zeigten, dass die körperliche Vorbelastung in den letzten Tagen vor einer LLD einen wesentlichen Einfluss auf die Testergebnisse haben kann. Sowohl die allgemeine Ermüdung als auch die Entleerung der Glykogenspeicher, welche aus einer Trainingsvorbelastung resultieren, können letztlich zu einer verminderten Leistung im Test führen. Weiterhin stellten sie fest, dass eine verminderte Laktatproduktion nicht nur zu tieferen submaximalen oder maximalen Laktatwerten führt, sondern auch zu falsch hohen Schwellenleistungen bei fixen Laktatschwellen. Ergänzend soll an dieser Stelle auf die Problematik des Aufwärmens unmittelbar vor der Durchführung einer LLD eingegangen werden. Tschopp et al. (2001) formulierten diesbezüglich, dass eine Erhöhung der Laktatwerte durch Aufwärmen bei genügend großer Anzahl von Stufen im submaximalen Bereich wieder ausgeglichen werden kann. Damit dürfte nach ihrer Meinung die 4 mmol/l – Leistung nicht beeinflusst werden, dies gilt allerdings nur, solange die unter Vorbelastung erhöhten Laktatwerte 3 mmol/l nicht überschreiten. Coen (1997) sowie Coen, Urhausen & Kindermann (1996b) konnten in diesem



Zusammenhang ähnliche Befunde präsentieren. Diese zeigen, dass Vorbelastungen mit resultierender Ausgangslaktatkonzentration um 4 mmol/l keinen Einfluss auf die Leistungsfähigkeit an der IAS nach *Stegmann, Kindermann & Schnabel (1981a)* sowie bei fixen Laktatschwellen haben.

#### 3.2.3.4 Kriterium „Ausbelastung“

*Kindermann (1985)* bezieht bezüglich des Kriteriums „Ausbelastung“ den grundsätzlichen Standpunkt, dass der erhobene submaximale Parameter anaerobe Schwelle weniger von der individuellen Motivation beeinflusst wird als maximale Parameter. Da alle Konzepte zur Bestimmung der aerob – anaeroben Schwelle diesem submaximalen Parameter entsprechen, scheint er in diesem Zusammenhang Allgemeingültigkeit zu erlangen. Dies gilt allerdings nur so lange, wie der Verlauf der LLK im maximalen Belastungsbereich unberücksichtigt bleibt. Für das Konzept der Bestimmung der IAS nach *Stegmann, Kindermann & Schnabel (1981a)* trifft dies nicht zu, da bei diesem Schwellenmodell der Verlauf der LLK während Belastung und Erholung Verwendung findet (vgl. Abb. 6). Auch wenn es den Anschein hat, dass eine zeichnerische Bestimmung der IAS nach *Stegmann, Kindermann & Schnabel (1981a)* ohne Erreichen einer hohen Ausbelastung mit einem deutlichen Laktatüberhang in der Nachbelastungsphase nicht möglich ist, bemerken *Coen (1997)* und *Coen, Urhausen & Kindermann (1996b)*, dass eine niedrige Ausbelastung nur zu einer geringgradigen Unterschätzung der Leistungsfähigkeit anhand der IAS – Bestimmung führt. *Coen (1997)* verweist diesbezüglich auf einen bestehenden Unterschied in der Laufgeschwindigkeit an der IAS, welcher seiner Ansicht nach jedoch keine praxisrelevanten Folgen für leistungsdiagnostische Beurteilungen beziehungsweise die Intensitätssteuerung des Ausdauertrainings nach sich zieht. Allerdings bemerken *Urhausen et al. (1994)*, dass zu einer exakten Bestimmung der IAS nach *Stegmann, Kindermann & Schnabel (1981a)* ein Überhang nach Belastungsabbruch vorliegen sollte und die Auswertung mit zunehmenden Grad der Ausbelastung erleichtert wird. Eine volle Ausbelastung scheint jedoch nicht zwingend notwendig, da die Möglichkeit besteht, die IAS auch bei submaximalen Testverfahren zu berechnen. In solchen Fällen sollte nach *Coen (1997)* der gesamte Verlauf der LLK bei der Interpretation der Daten eine höhere Bedeutung erlangen.

### 3.2.3.5 Kriterium „Trainingszustand“

Das Kriterium „Trainingszustand“ erscheint deshalb von Bedeutung, weil nach der Entwicklung des Konzepts der aerob – anaeroben Schwelle von *Mader et al. (1976)* festgestellt wurde, dass nur gering ausdauertrainierte Probanden die abgeleiteten Intensitätsbereiche tolerieren können, hoch ausdauertrainierte Athleten dagegen zu stark belastet sind (*Heck, 2001*). *Keul et al. (1979)* fanden diesbezüglich heraus, dass durch das von *Mader et al. (1976)* entwickelte Konzept den individuellen genetischen und trainingsbedingten Veränderungen von Laktatbildung und –elimination nicht Rechnung getragen werden kann. Das Niveau der Laktatspiegel kann nach ihrer Ansicht im Einzelfall erheblich differieren und somit die Beurteilung der Dauerleistungsfähigkeit und die Beratung bezüglich der Trainingssteuerung erschweren. *Keul et al. (1979)* entwickelten aus dieser Problemstellung heraus ein Konzept, welches sich an einer für jeden Einzelnen gleich steilen Zunahme der Laktatproduktion unter ansteigender Belastung im Stufentest orientiert (vgl. Abb. 4). Auch bei der Entwicklung des Schwellenkonzepts nach *Simon et al. (1981)* bestand die Zielstellung darin, durch die Analyse des Laktatverhaltens während ansteigender Ergometerbelastung zu klären, inwieweit ein unterschiedlicher Trainingszustand die Laktatkonzentration beziehungsweise das Laktatverhalten an der anaeroben Schwelle beeinflusst. Die Ergebnisse der Untersuchungen von *Simon et al. (1981)* zeigten eine Abhängigkeit vom Trainingszustand in der Art, dass die Dauerleistungsgrenze für Ausdauertrainierte bei einer niedrigeren Laktatkonzentration als 4 mmol/l überschritten wird. Aufgrund dieser Befunde ergibt sich nach Meinung von *Simon et al. (1981)* für Ausdauertrainierte die Notwendigkeit einer Trainingssteuerung, die sich nicht an der fixen 4 mmol/l – Schwelle sondern an einer anaeroben Schwelle, welche für Laufbandbelastungen in km/h bei  $\tan \alpha = 1$  bestimmt wird, orientiert. *Dickhuth et al. (1988)* entwickelten ein Konzept, welches aufgrund des Bestimmungsverfahrens (vgl. Abb. 8) in der Lage ist, die IAS bei Veränderung der Basislaktatkonzentration durch verschiedene Trainingszustände zu bestimmen. Aufgrund des konstanten Abstands der IAS nach *Dickhuth et al. (1988)* zu den Basislaktatwerten, wird diese bei unterschiedlichen Absolutwerten erreicht und ist somit in der Lage, die individuellen Verhältnisse des Laktatverhaltens besser zu repräsentieren als Modelle mit fixen Laktatschwellen.

### 3.2.3.6 Kriterium „Dimension der Geschwindigkeit (m/s, km/h)“

Aufgrund der Tatsache, dass die Bestimmung der aerob – anaeroben Schwelle bei der Laufbandergometrie mit unterschiedlichen „Dimensionen der Geschwindigkeit (m/s, km/h)“ durchgeführt werden kann, erscheint es notwendig, die Abhängigkeit der verschiedenen Schwellenkonzepte von einer Transformation der Dimensionen m/s und km/h aufzuzeigen. Nach Heck, Hess & Mader (1985a) bleiben die Bestimmungsmethoden von Mader et al. (1976) und Stegmann, Kindermann & Schnabel (1981a) von einer Transformation unberührt. Dagegen zeigen die Verfahren nach Keul et al. (1979) und Simon et al. (1981) eine Abhängigkeit in der Art, dass die ursprünglich ermittelten Steigungswinkel nur für die Dimension km/h korrekt sind und somit mit dem Faktor 3,6 ( $1 \text{ m/s} = 3,6 \text{ km/h}$ ) angepasst werden müssen. Für die Bunc – Schwelle (Bunc et al., 1982) ist nach Heck, Hess & Mader (1985a), aufgrund der Definition der Schwelle, keine Transformation möglich, und es ergeben sich deshalb verschiedene Schwellenwerte in Abhängigkeit der Dimension.

### 3.2.3.7 Kriterium „Anfangsbelastung“

Das Kriterium „Anfangsbelastung“ erlangt Bedeutung, da nach Heck & Hollmann (1985b) bei der Laufbandergometrie Geschwindigkeiten existieren, bei denen Untrainierte schon früh einer hohen anaeroben Belastung unterliegen können, und Langstreckenläufer in diesem Belastungsbereich nur gering beansprucht werden. Aus diesem Grund empfehlen die genannten Autoren, auf eine einheitliche Anfangsbelastung für Trainierte und Untrainierte zu verzichten und stattdessen variabel zu beginnen. Die Abhängigkeit der Ergebnisse der LLD von der Anfangsbelastung bestätigen auch Steuer, Höltnke & Jakob (2003) mit ihrer Feststellung, dass es umso schneller zu einer Überbewertung der IAS nach Dickhuth et al. (1988) kommt, je später mit der Auswertung begonnen wird (vgl. Abb. 8). Speziell bei der Laufbandergometrie können für untrainierte Probanden Probleme bezüglich der Auswertung der LLK entstehen, da einerseits eine bestimmte Geschwindigkeit notwendig ist, um eine Laufbewegung zu vollziehen, andererseits diese Belastung bereits eine kontinuierliche Laktatzunahme ohne Erreichen eines Lass hervorrufen kann. Für die Fahrradergometrie treten nach Steuer, Höltnke & Jakob (2003) diese Probleme, aufgrund der Möglichkeit die Anfangsbelastung beliebig niedrig zu wählen, nicht auf. In direktem Zusammenhang mit dem Kriterium

Anfangsbelastung sind weitere Parameter, wie die Anzahl der Messwerte oder das Auftreten der Basislaktatkonzentration, zu nennen. Auch diese Größen erlangen speziell bei der Bestimmung der IAS nach *Dickhuth et al. (1988)*, aufgrund der oben genannten Problematik, Bedeutung (vgl. Abb. 8).

### **3.2.4 Verifizierung / Falsifizierung eines postulierten Anpassungsphänomens**

Dieser Abschnitt soll sich mit dem postulierten Anpassungsphänomen auseinandersetzen, wonach mit zunehmender Ausdauerleistungsfähigkeit der Laktatwert an der individuell bestimmten, aerob – anaeroben Schwelle sinkt. Auch diesbezüglich kann festgestellt werden, dass die wissenschaftliche Befundlage keineswegs von Konformität geprägt ist. Der Ursprung für die Entstehung des oben genannten Postulats ist in der Arbeit von *Mader et al. (1976)* zu sehen, in der die Autoren erkannten, dass bei 4 mmol/l Laktat im Mittel diejenige Belastungsintensität erreicht wird, bei der sich ein maxLass einstellt und somit die Dauerleistungsgrenze repräsentiert wird. Die Probleme, welche sich aus der von *Mader et al. (1976)* getroffenen Aussage ergaben, wurden zusammenfassend von *Heck (2001)* beschrieben. Danach können die von *Mader et al. (1976)* abgeleiteten Intensitätsbereiche nur von gering Ausdauertrainierten toleriert werden. Die Befunde von *Keul et al. (1979)*, *Simon et al. (1981)* sowie *Pessenhofer, Schwabegger & Schmid (1981)* können in diesem Zusammenhang als ursächlich angesehen werden, da sie belegen, dass mit Zunahme der Ausdauerleistungsfähigkeit die Dauerleistungsgrenze bereits bei niedrigeren Laktatkonzentrationen überschritten wird. Ähnlich äußerten sich auch *Stegmann, Kindermann & Schnabel (1981a)* in ihrer Originalpublikation bezüglich der Bestimmung der IAS und konstatierten, dass im Allgemeinen mit steigender aerober Kapazität die Laktatkonzentration an der IAS sinkt. Die Ergebnisse ihrer Arbeit werden durch praktische Erfahrungen und frühere Befunde bestätigt, wonach mit zunehmender Ausdauertrainiertheit die kritische Änderung der Kurvensteigung bei niedrigeren Laktatkonzentrationen erreicht wird (*Stegmann & Kindermann, 1981b*). Ähnliche Ergebnisse wurden auch von *Urhausen et al. (1994)* präsentiert, die verdeutlichen, dass bei verschiedenen Testverfahren (Laufband- und Fahrradergometrie) sowohl bei Männern als auch bei Frauen der Laktatwert an der IAS mit zunehmender Ausdauerleistungsfähigkeit niedriger liegt. Weitere Ergebnisse von *Urhausen et al. (1994)* zeigten, dass bei hochtrainierten

Langstreckenläufern mit 2,5 mmol/l ein im Mittel niedrigeres Laktat an der IAS im Vergleich zu 3,6 mmol/l bei hochtrainierten Sprintern vorliegt. *Tschopp et al. (2001)* weisen außerdem darauf hin, dass die anaerobe Schwelle bei Ausdauertrainierten typischerweise bei 2,5 – 3 mmol/l Laktat liegen würde. Ihrer Ansicht nach ist dafür der höhere Anteil an Typ 1 – Fasern verantwortlich, welcher mit einer verminderten Laktatproduktion und einem erhöhten Laktatabbau einhergeht. Im Gegensatz dazu treten bei Nichtausdauertrainierten, aufgrund der raschen Rekrutierung von Typ 2 – Fasern und der verminderten Laktatelimination, maxLass – Laktatwerte von 5 – 6 mmol/l auf.

Wiederum sind es *Heck* und Mitarbeiter (*Heck, Hess & Mader, 1985a; Heck & Roszkopf, 1994; Heck, 2004*), welche sich mit der hier diskutierten Fragestellung bezüglich des postulierten Anpassungsphänomens kritisch auseinandersetzten. *Heck, Hess & Mader (1985a)* stellten in diesem Zusammenhang fest, dass zwischen dem Laktatwert des maxLass und der Ausdauerleistungsfähigkeit keine signifikante Beziehung besteht. Diesbezügliche Untersuchungen wiesen für Ausdauertrainierte maxLass – Laktatwerte von 3,5 – 4,0 mmol/l auf. Im Mittel wurde bei den vorliegenden Studien ein Laktatwert von 4,02 berechnet, womit eine Abhängigkeit von der Ausdauerleistungsfähigkeit nicht nachweisbar war. Diese Ergebnisse stehen somit im Widerspruch zu den oben genannten Ableitungen von *Urhausen et al. (1994)* und *Tschopp et al. (2001)*. Weitere experimentelle Befunde von *Heck & Roszkopf (1994)* bestätigen die Unabhängigkeit von Ausdauerleistungsfähigkeit und Schwellenlaktatwert. Dabei konnte gezeigt werden, dass sowohl für die Laufbandergometrie ( $r = -0,274$ ,  $p > 0,05$ ) als auch für die Fahrradergometrie ( $r = 0,105$ ,  $p > 0,05$  [Erwachsene];  $r = 0,159$ ,  $p > 0,05$  [Kinder]) keine signifikanten Korrelationen existieren. Lediglich für die im Leistungssport kaum angewandte Drehkurbelergometrie ( $r = 0,344$ ,  $p \leq 0,05$ ) konnte eine schwach signifikante Korrelation nachgewiesen werden.

Da die wissenschaftliche Auseinandersetzung bezüglich einzelner Problemstellungen oft einem „Lagerkampf“ gleicht, sollen an dieser Stelle auch jene Autoren zu Wort kommen, welche darum bemüht sind, die Potenzen der LLD und ihrer Ergebnisse bezüglich der hier diskutierten Fragestellungen zu kennzeichnen. Dabei sind vorrangig die Publikationen des Saarbrücker Arbeitskreises um *Kindermann* zu nennen (*Stegmann, Kindermann & Schnabel, 1981a; Stegmann & Kindermann,*

1981b). Schon in der Originalpublikation zur Entwicklung eines neuen Schwellenkonzepts von *Stegmann, Kindermann & Schnabel (1981a)* verweisen die genannten Autoren darauf, dass die Laktatkonzentration an der IAS interindividuell innerhalb weiter Grenzen variiert und sich deshalb der Gebrauch von individuellen, trainingssteuernden Vorgaben empfiehlt. Weiterhin sollte ihrer Meinung nach insbesondere bei der LD im Hochleistungstraining (HLT) die Bestimmung der IAS angestrebt werden, da im Einzelfall der Schwellenlaktatwert erheblich von der im Mittel bestimmten 4 mmol/l – Schwelle abweichen kann (*Stegmann & Kindermann, 1981b*). Die genannten Autoren konnten in diesem Zusammenhang außerdem belegen, dass die Laktatkonzentration an der IAS niedriger liegt, je stärker die LLK nach rechts verschoben ist. Jedoch wird auch diesbezüglich auf die relativ große Variationsbreite der niedrigsten und höchsten gemessenen Schwellenlaktatwerte hingewiesen.

### **3.2.5 Übertragbarkeit der Labor- / Feldtestergebnisse in Training und Wettkampf**

Um den hohen wissenschaftlichen Aufwand im Zusammenhang mit leistungsdiagnostischen Untersuchungen zu rechtfertigen, besteht von Seiten der Trainer und Athleten die Hoffnung, dass ein höchstmöglicher Transfer der Labor- und Feldtestergebnisse (Theorie) in die Trainings- und Wettkampfsteuerung (Praxis) ermöglicht werden kann. Da Labortests nicht alle Fragestellungen der Trainer bezüglich der Trainingssteuerung klären können, ist nach *Neumann & Schüler (1994)* darauf zu achten, dass die als wichtige Ergänzungsmethode entwickelten Feldtestverfahren gegenüber Witterungsverhältnissen anfällig sind und somit Längsschnittvergleiche beeinflusst werden können. Allerdings besteht nach ihrer Auffassung eine grundsätzliche Übereinstimmung von Labor- und Feldtests in Bezug auf die diagnostischen Intentionen. Wesentliche Zielstellungen sind dabei unter anderem die Erhebung der Leistung im Längs- und Querschnitt (*Heck & Hollmann, 1985b; Heck & Schulz, 1999*), die Erfassung der für die Wettkampfleistung bestimmenden Teilkomponenten (*Dickhuth et al., 1996*), die Prognose der Wettkampfleistungen (*Rieder, Weiler & Kindermann, 1987a; Röcker et al., 1997*) und die Prüfung der Effizienz bestimmter Trainingsmittel und Trainingszyklen (*Donath, Clausnitzer & Schüler, 1969*). Nur wenn diese Zielstellungen bekannt sind und sich



Sportmediziner und Trainingswissenschaftler diesen verpflichtet fühlen, scheint der oben genannte höchstmögliche Transfer möglich. In den folgenden Ausführungen sollen die mit den Zielstellungen im Zusammenhang stehenden Problemfelder dargestellt, deren Ursachen aufgezeigt und Möglichkeiten zur Behebung der Probleme vorgestellt werden.

Bevor die oben genannten Schwerpunkte thematisiert werden, erscheint es von Bedeutung, einem Grundproblem der Aussagekraft der Befunde nachzugehen. Dieses befasst sich mit der Gesamtvariabilität der erhaltenen Messwerte und zeigt die Schwierigkeit der Interpretation der Ergebnisse und der daraus abgeleiteten Empfehlungen für die Trainingssteuerung. *Tschopp et al. (2001)* stellten diesbezüglich fest, dass die Ergebnisse der LD selbst bei optimaler Testdurchführung einer vom Trainingszustand unabhängigen technischen und biologischen Variabilität von 2 – 3 % unterliegen. *Heck (2001)* spricht von einer Gesamtvariabilität von ca. 4 % für Belastungen bei 4 mmol/l Laktat. Von einer Abweichung von ca. 5 % berichtet *Schamne (2007, mündliche Mitteilung)*. Dies würde bei einer Schwellenleistung von 200 W einen Streubereich von 190 – 210 W ergeben. Vor diesem Hintergrund wird die Umsetzung der Testergebnisse generell erschwert. Außerdem erwächst daraus die Notwendigkeit, weitere variable Einflussgrößen höchstmöglich zu standardisieren (vgl. 3.2.3 und 3.2.6).

Die grundlegende Problematik bezüglich der Übertragbarkeit der Laborergebnisse in den Trainingsprozess besteht nach *Neumann & Gohlitz (1996)* darin, dass sich die Belastungsempfehlungen auf Basis der Laborergebnisse und deren praktische Umsetzung im Lauftraining nicht immer in Kongruenz befinden. Ähnlich äußern sich auch *Heck et al. (1986)*, die auf eine begrenzte Anwendbarkeit der Schwellen in der Trainingssteuerung verweisen. Nach ihrer Auffassung wird dies im Wesentlichen durch eine wenig präzise Projektion der Stufentestergebnisse auf Dauerbelastungen sowie durch eine begrenzte Übertragbarkeit der Laborergebnisse auf Feldbedingungen verursacht. Nach den Befunden von *Bachmann & Burtcher (1999)* zeigten sich Schwierigkeiten, das maxLass für Belastungen im Feld sowie Vorgaben zur Intensitätssteuerung im Training von Laboruntersuchungen abzuleiten. In diesem Zusammenhang verwiesen sie darauf, dass die traditionelle Ableitung von Trainingsvorgaben aus der im Labor ermittelten 4 mmol/l – Laktatschwelle lediglich für die Verbesserung der allgemeinen Fitness von Gesundheits- und Hobbysportlern



ausreicht. Die Steuerung der Trainingsintensität von Hochleistungssportlern nach dieser Methode erscheint jedoch inadäquat. Eine weitere Problemstellung ist die durch unklare beziehungsweise fehlerhafte Testinterpretationen und widersprüchliche Ergebnisse hervorgerufene Verunsicherung der Trainer (*Bueno, 1990*).

Bezüglich der Ursachen für die aufgezeigten Problemfelder schreibt *Kindermann (1979)*, dass sportmedizinische Tests in besonderem Maße der biologischen Variabilität unterliegen und zusätzlich durch die Untersuchungssituation beeinflusst werden. Ein Transfer von den unter Laborbedingungen erhobenen sportmedizinischen Befunden auf die jeweilige spezifische Belastungssituation scheint nicht ohne Einschränkung möglich. *Dickhuth et al. (1989)* sehen neben der falschen Testwahl vordergründig die Fehl- beziehungsweise Überinterpretation der gewonnenen Ergebnisse aus der LLD und die zu optimistische und vereinfachte Darstellung von Seiten der Sportmediziner als ursächlich für den mangelnden Erfolg bezüglich der Umsetzung der leistungsdiagnostischen Ergebnisse in die Trainings- und Wettkampfpraxis an. Im Zusammenhang mit der Trainingssteuerung anhand von Laborergebnissen äußerte sich *Heck (1990b)*, dass direkt abgeleitete Intensitätsangaben zur Belastungskontrolle nur bedingt möglich sind. Diesbezüglich wurden die eingeschränkte Übertragbarkeit der Belastungseigenschaften vom Labor auf Feldbedingungen, die Unzulässigkeit von Trainingsempfehlungen anhand der Herzfrequenz bei nicht sportartspezifischer Belastung und die Unzulässigkeit von Trainingsempfehlungen anhand der Schwellenwerte von ansteigenden Belastungstests als Gründe angeführt. *Heck (1990b)* verwies weiterhin auf den Einfluss thermoregulatorischer Prozesse bei leistungskonstanten Dauerbelastungen auf dem Fahrradergometer. Dabei konnte festgestellt werden, dass bei Laktatwerten von 2 – 4 mmol/l innerhalb von 10 min ein Herzfrequenzanstieg von ca. 5 – 6 min<sup>-1</sup> und innerhalb von 20 min von 10 – 12 min<sup>-1</sup> erfolgt. Im Training bedeutet folglich ein Herzfrequenzanstieg nicht zwangsläufig einen steigenden Anteil an anaerober Energiebereitstellung mit nachfolgendem Laktatanstieg. Ein herzfrequenzkonstantes Training mit Reduktion der Leistung würde demnach die Dauerbelastung stärker in den aeroben Bereich verschieben (*Heck, 1990b*). Eine weitere Ursache für die eingeschränkte Übertragbarkeit der Laborergebnisse auf dem Laufband in die Praxis des Lauftrainings ist laut *Föhrenbach et al. (1985)* darin zu sehen, dass beim Laufen

im Feld der mit der Laufgeschwindigkeit zunehmende Windwiderstand einen wachsenden Energiebedarf erzeugt. Speziell im hohen Geschwindigkeitsbereich nimmt demzufolge die Differenz zwischen Laborlaufgeschwindigkeiten und Feldlaufgeschwindigkeiten bei gegebenen Laktatkonzentrationen zu. Aufgrund dieser immanenten Transferproblematik entwickelten *Föhrenbach et al. (1985)* ein Felduntersuchungsverfahren, welches es erlaubt, unterschiedliche metabolische Zustände mit relativ guter Präzision in Abhängigkeit von der Dauer und der Intensität geplanter Trainingseinheiten direkt über die Laufgeschwindigkeit zu steuern. Dies ist nach ihrer Auffassung allerdings nur möglich, wenn sich Trainings- und Testumgebung im Profil annähernd gleichen. Vor diesem Hintergrund ist auch die optimistische Aussage von *Liesen et al. (1985)* zu verstehen, wonach durch Feldstufentests oder durch standardisierte, mit ihm vergleichbare Laufbandtests für einen Langstreckenläufer relativ genaue Angaben zur Laufgeschwindigkeit innerhalb eines differenzierten Trainingsprozesses gemacht werden können. In Abb. 18 werden die von *Föhrenbach et al. (1985)* durchgeführten Felduntersuchungen und die abgeleiteten trainingssteuernden Maßnahmen vorgestellt.

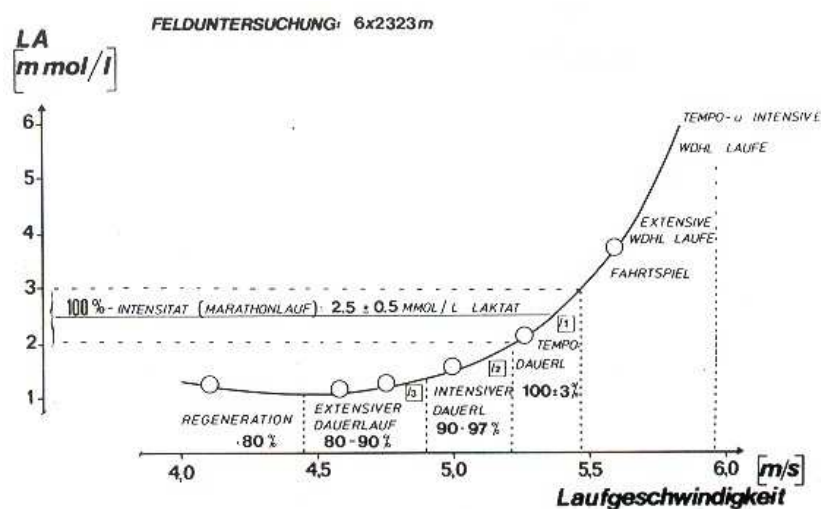


Abb. 18: Möglichkeiten der Trainingssteuerung anhand der aus dem Feldstufentest (6 x 2323 m) gewonnenen Ergebnisse (*Föhrenbach et al., 1985*).

Auch *Bueno (1990)* verweist bezüglich der oben genannten Transferproblematik auf die Unverzichtbarkeit von ergänzenden Feldtests, da diese spezifischer sind und präzisere Angaben zur Strukturierung des Trainings liefern. Jedoch wird in diesem Kontext auch angedeutet, dass Feldtests schwieriger zu reproduzieren und zu standardisieren sind. Ähnlich äußern sich auch *Bachmann & Burtcher (1999)*. Sie

konstatieren, dass die Bestimmung des maxLass sowie die Beobachtung der wettkampfspezifischen kardiopulmonalen und metabolischen Reaktionen unter Feldbedingungen erfolgen sollte. Mit einer weiteren Fragestellung setzten sich *Dickhuth et al. (1996)* auseinander. Sie stellten fest, dass gerade im Hochleistungsbereich die wissenschaftliche Überprüfung der Wirksamkeit bestimmter Trainingsmittel und –intensitäten schwierig erscheint, da nur kleine Kollektive für begrenzte Zeit zur Verfügung stehen, und außerdem die zu erwartenden Effekte gering ausfallen. Bezüglich der Transferproblematik wurde von *Urhausen et al. (1994)* darauf hingewiesen, dass die aus der LLD abgeleiteten Intensitätsvorgaben für das Ausdauertraining lediglich Empfehlungen darstellen. Diese müssen insbesondere bei Hochleistungssportlern, aufgrund einzelner Ausreißer und nicht simulierbarer externer Faktoren, im Feldtest überprüft und validiert werden. Weiterhin vermerkten *Urhausen et al. (1994)*, dass die von ihnen durchgeführten systematischen Studien und die entsprechenden Feldtestuntersuchungen einen Ansatz darstellen, die noch offene Überprüfung theoretischer Konzepte unter Praxisbedingungen vorzunehmen. Als wesentliche Voraussetzungen für die korrekte Ansteuerung der beabsichtigten Intensität werden in diesem Zusammenhang von *Coen, Urhausen & Kindermann (1994b)* die Kenntnis der Beziehung zwischen prozentualer Schwellengeschwindigkeit und Laktatkonzentration sowie das Wissen über die Beeinflussung dieser Beziehung durch externe Faktoren wie Geländeprofil und klimatische Bedingungen angesehen. Aufgrund der Befunde von *Coen (1997)* zeigte sich, dass die IAS – Bestimmung nach *Stegmann & Kindermann (1981b)* als Maß für den Bereich des maxLass gelten kann, auch wenn 100 % IAS – Belastung nicht immer die exakte Wiedergabe des maxLass ermöglicht. Sie verweisen darauf, dass die anaerobe Schwelle keinen punktuellen Parameter darstellt und somit eher einem Orientierungsmaß im aerob – anaeroben Übergangsbereich entspricht. Nach *Röcker & Dickhuth (1994)* ist es für die Trainingssteuerung notwendig, dem Verlauf der LLK bestimmte Belastungsintensitäten zuordnen zu können, um den Transfer vom Labor ins Feld zu gewährleisten. Das von *Dickhuth et al. (1988)* entwickelte Konzept kann zur Umsetzung dieser Aufgabenstellung beitragen und zeigt neben der einfachen Handhabung, eine Unabhängigkeit vom Belastungsprotokoll, von der Ruhelaktatkonzentration sowie vom Ausbelastungszustand (*Röcker & Dickhuth, 1988*). Ein weiterer entscheidender Aspekt wird von *Neumann & Gohlitz (1996)* thematisiert, wonach umfassende und objektive Trainingsempfehlungen nur dann

erstellt werden können, wenn die Ergebnisse der LLD mit einer Trainingsanalyse verknüpft und mittels einer Wettkampfanalyse vervollständigt werden.

### **3.2.6 Grundlegende Standardisierungsmaßnahmen**

Im Gegensatz zu den in Kapitel 3.2.3 aufgeführten beeinflussenden Kriterien sollen an dieser Stelle grundlegende Standardisierungsmaßnahmen vorgestellt werden, welche unabhängig vom Auswertungsalgorithmus Bedeutung erlangen. Diese Maßnahmen stellen somit eine notwendige Voraussetzung für die anschließende Bestimmung der aerob – anaeroben Schwelle dar und sollten generell, das heißt unabhängig von der Philosophie des jeweiligen Schwellenkonzepts, angewendet werden. Da nur eine qualitativ hochwertige Bestimmung der LLK den wissenschaftlichen Aufwand bezüglich der Trainingssteuerung zu rechtfertigen scheint, sollte diese vorrangige Priorität erlangen. Qualitativ hochwertig bedeutet in diesem Kontext, dass die LLK während ansteigender Belastung die metabolische Reaktion des Probanden möglichst genau abbildet und außerdem für die Beanspruchungsverhältnisse in der Praxis als repräsentativ angesehen werden kann. Schon *Donath, Clausnitzer & Schüler (1969)* verwiesen darauf, dass die Blutlaktatwerte und damit die LLK nur dann aussagekräftig und vergleichbar sind, wenn die Prüf- und Belastungsverfahren entsprechend den Vorschriften der Standardisierung angewendet werden. Sollen Schlussfolgerungen über Leistungsstand, Trainingsgestaltung und Leistungserwartung getroffen werden, ist nach *Keul et al. (1981)* eine Standardisierung der Testverfahren notwendig, da es in Folge unterschiedlicher Belastungsarten zu differenten Reaktionen kommt und eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse nicht gewährleistet werden kann. *Kettmann & Huber (1994)* erstellten, aufgrund der Schwierigkeit der Ergebnisinterpretation bei unzureichender Standardisierung, für die Hauptuntersuchungszentren des Bund Deutscher Radfahrer (BDR) einen Maßnahmenkatalog, welcher die Sicherung der Ergebnisqualität gewährleisten soll. Sie fordern in diesem Zusammenhang die Verwendung gleicher (vergleichbarer) Grundtests, die Verwendung gleicher (vergleichbarer) Gerätesysteme, die Anwendung gleicher Testprotokolle und die Nutzung gleicher Auswerte- und Interpretationsalgorithmen. Damit könnte der Forderung von *Heck & Hollmann (1985b)* nach einer Vergleichbarkeit der

Untersuchungsergebnisse zwischen den leistungsdagnostisch ausgerichteten Instituten entsprochen werden.

#### 3.2.6.1 Spezifität der Belastungsform

Eine grundsätzliche Feststellung bezüglich der „Spezifität der Belastungsform“ erfolgte durch *Mader et al. (1976)*. Nach ihrer Auffassung besteht die Notwendigkeit der Anpassung der Belastungsstruktur der gewählten Ergometrie an die Belastungsstruktur unter Feldbedingungen in möglichst vielen Details. Begründet wird dies damit, dass sich ein hoher Anteil der Trainingsadaptationen primär in der im Training in der jeweiligen Spezialsportart beanspruchten Muskulatur vollzieht, und somit der Untersuchung zur Beurteilung der sportartspezifischen Ausdauerleistungsfähigkeit auch eine sportartspezifische Belastungsform zugrunde liegen muss. Auch *Tschopp et al. (2001)* betonen die Bedeutung der Verwendung sportartspezifischer Testgeräte, da Testergebnisse, welche aus der sportartspezifischen Ergometrie gewonnen werden, sensibler auf Trainingsanpassungen reagieren. Weiterhin werden von *Hollmann et al. (1987)* Befunde präsentiert, nach denen erhebliche qualitative und quantitative Unterschiede in der Benutzung verschiedener Diagnostikverfahren auftreten. Dabei sind die Mittelwertunterschiede der Sauerstoffaufnahme zwischen Laufband- und Fahrradergometrie an der aeroben (2 mmol/l Laktat) und anaeroben Schwelle (4 mmol/l Laktat) mit  $p \leq 0,001$  hochsignifikant. Folglich werden nach *Hollmann et al. (1987)* genügend zuverlässige Vergleiche der Ergebnisse ein und derselben Person bei Benutzung unterschiedlicher Belastungsverfahren nahezu unmöglich. Ähnlich äußern sich auch *Heck & Schulz (1999)*. Sie stellten fest, dass sich die Leistungswerte im submaximalen Bereich bei definierten Laktatwerten dann unterscheiden, wenn unterschiedliche Belastungsgeräte genutzt werden. Als Erklärung für die auftretenden Differenzen lassen sich nach *Heck & Schulz (1999)* primär die unterschiedlichen Massen der eingesetzten Muskulatur anführen. Noch weiter gehen *Bachl et al. (1994)*, wenn sie bezüglich der Spezifität der LD darauf verweisen, dass nur jene trainings- und wettkampfbegleitenden Tests als sportartspezifische Leistungsprüfverfahren zu akzeptieren sind, welche vom motorischen Stereotyp her der jeweiligen Spezialdisziplin entsprechen. Nach ihrer Meinung sind somit Testverfahren an Spezialergometern allenfalls als semispezifisch

anzusehen, was bei der Interpretation der gewonnenen Ergebnisse berücksichtigt werden muss. Notwendig ist laut *Bachl et al. (1994)* die genaue physikalische und motorisch – strukturelle Definition der aktuellen Belastung, um die innere Beanspruchung valide erfassen zu können. Abschließend soll an dieser Stelle auf *Mader et al. (1976)* eingegangen werden, welche bereits vor Jahren folgendes postulierten:

„Da die Anpassungen des muskulären Energiemetabolismus weitestgehend abhängig sind von der Belastungsstruktur im Training, muss der Untersuchung zur Beurteilung z. B. der sportartspezifischen Ausdauerleistungsfähigkeit soweit wie möglich eine sportartspezifische Belastungsform zugrunde liegen. Je weiter wir uns von dieser Prämisse entfernen, umso schlechter ist die Aussage für Trainer und Sportler, insbesondere bezüglich der trainingsoptimierenden Maßnahmen.“ (*Mader et al., 1976, 81*)

#### 3.2.6.2 Angleichung der Belastungsverhältnisse in Labor und Feld

Die „Angleichung der Belastungsverhältnisse“ auf dem Fahrradergometer mit denen auf dem Trainings- beziehungsweise Wettkampfrad ist bei wattbezogener Trainingssteuerung relativ genau zu vollziehen (unter der Voraussetzung der genauen Kalibrierung der Wattmessgeräte in Labor und Feld!). Nach *Kettmann & Huber (1994)* besteht im Radsport der Vorteil darin, dass am Ergometer die physikalische Leistung gemessen wird, und sich somit der jeweilige Beanspruchungsgrad des Probanden eichen lässt. Dieser kann nach ihrer Ansicht auch am freien Rad in Training und Wettkampf gemessen werden und erlaubt somit eine Rückkopplung zu den in der LLD erhobenen Belastungsempfehlungen. *Stockhausen et al. (1994)* äußerten sich bezüglich der Potenzen des wattgesteuerten Trainings im Radsport noch relativ zurückhaltend und vermerken, dass die kontinuierliche Leistungsmessung auf dem Rad als ein zuverlässiger Parameter zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit und zur Steuerung des Trainings in Zukunft zunehmende Bedeutung erlangen wird.

Dagegen erscheint bei der Laufbandergometrie die Anpassung der Teststreckenverhältnisse an die Bedingungen in Training und Wettkampf aus physikalischen Gesichtspunkten problematischer. Ein erstes Problemfeld ergibt sich



aus der Feststellung von *Heck & Hollmann (1985b)*, dass prinzipiell zwei Möglichkeiten der Änderung der Belastungsintensität auf dem Laufband bestehen. Danach kann die Belastungssteigerung entweder über die Variation der Geschwindigkeit bei konstantem Anstiegswinkel erfolgen oder über die sukzessive Änderung des Anstiegswinkels. Diese Autoren geben jedoch zu bedenken, dass die Belastungssteigerung über einen veränderten Anstiegswinkel für den Leistungssport nicht brauchbar ist. Begründet wird dies mit der andersartigen Qualität der Belastung und der damit einhergehenden Veränderung des motorischen Beanspruchungsprofils. Diese Beobachtung wird von *Neumann & Schüler (1994)* bestätigt. Ihrer Auffassung folgend ist die Laufbandneigung bei niedrigen Geschwindigkeiten noch von geringer Bedeutung, jedoch erfolgt bei Anstellungen der Bänder von  $\geq 1^\circ$  (entspricht  $\sin \alpha \geq 0,0175$ ) eine erhebliche Störung des Laufens. Demnach sollte das Band bei leistungsdiagnostischen Untersuchungen von Spitzenläufern flach bewegt werden. Die zweite Variante der Intensitätserhöhung findet somit aus pragmatischen Gründen kaum Anwendung bei der Durchführung von Laufbanduntersuchungen. Offensichtlich scheint sich die Intensitätssteuerung über eine Steigerung der Geschwindigkeit bei konstantem Anstiegswinkel in der diagnostischen Laborpraxis durchgesetzt zu haben. Die grundsätzliche Problematik der Angleichung der Laborlaufgeschwindigkeit an die Feldlaufgeschwindigkeit bei gegebenen Laktatkonzentrationen bleibt nach *Föhrenbach et al. (1985)* jedoch weiterhin existent. Gerade im hohen Geschwindigkeitsbereich erzeugt der Einfluss des Windwiderstands eine zunehmende Geschwindigkeitsdifferenz. Bezüglich der Anpassung der Teststreckenverhältnisse an die Bedingungen in Training und Wettkampf stellten *Keul et al. (1981)* fest, dass die einzelnen Laufbänder erfahrungsgemäß eine unterschiedliche Eigendynamik aufweisen. Diese bewirkt eine Veränderung des Energieverbrauchs und muss somit nach ihrer Auffassung ausgetestet werden. Um eine Angleichung der Laufbanduntersuchungen an den realen Energieverbrauch auf der Bahn vorzunehmen, empfehlen *Mader et al. (1976)*, bei Geschwindigkeiten von 3,4 – 4,6 m/s eine Steigung von 1 % und bei Geschwindigkeiten von 4,6 – 6,0 m/s eine Steigung von 1,5 % zu wählen, um im Labor die Feldbedingungen annähernd zu simulieren. Auch *Heck & Hollmann (1985b)* verweisen in diesem Zusammenhang darauf, dass Laufband nicht gleich Laufband ist, und aus einem identischen Belastungsschema unterschiedliche metabolische Antworten resultieren können. Daraus ergibt sich nur dann die



Möglichkeit der Trainingsteuerung, wenn die Belastungseigenschaften des Laufbandes an die Feldbedingungen angeglichen werden beziehungsweise Korrekturgleichungen bekannt sind, die eine Umrechnung und Anpassung der Leistungsparameter ermöglichen. *Heck & Hollmann (1985b)* empfehlen aus diesem Grund, durch eine Änderung des Anstiegswinkels, die Belastungseigenschaften des Laufbandes für einen definierten Geschwindigkeitsbereich an die Feldbedingungen anzugleichen. Sie befürworten zum Ausgleich des fehlenden Windwiderstandes einen Anstiegswinkel von 1,5 %. Allerdings nur, wenn die Belastungseigenschaften des Laufbandes nicht bekannt sind. Wie groß die Abweichungen zwischen Teststrecke und Trainingsstrecke im Einzelfall sein können, wurde von *Heck et al. (1982)* nachgewiesen. Sie fanden heraus, dass zwischen zwei verschiedenen Laufbändern und den zugehörigen LLK deutliche Unterschiede bestehen. Die Differenzen der Laufgeschwindigkeiten betrugen im Bereich der 4 mmol/l – Schwelle 0,4 m/s (vgl. Abb. 19).

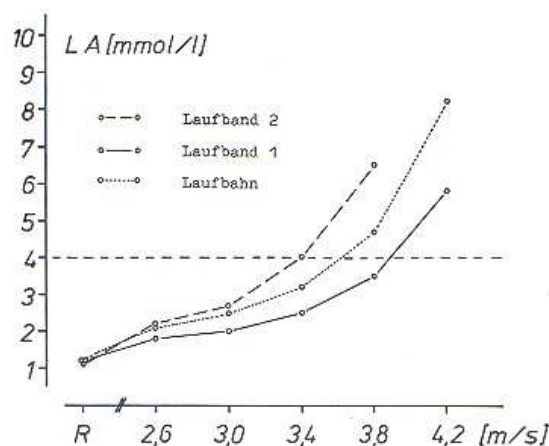


Abb. 19: Mittelwerte des Laktats in Abhängigkeit von der Laufgeschwindigkeit während stufenweise ansteigender Belastung für eine Kunststoffbahn und zwei verschiedene Laufbänder. Abb. aus *Heck & Hollmann (1985b)*.

Als ursächlich für die in Abb. 19 abgebildeten Differenzen sind nach *Heck & Hollmann (1985b)* die unterschiedliche Dämpfung des Laufbelags und die differenten Schwingungseigenschaften der Laufbänder anzuführen. Eine biologische Kalibrierung der Laufbänder über den Anstiegswinkel kann nach ihrer Auffassung eine annähernde Vergleichbarkeit erzeugen. Ähnlich äußert sich auch *Heck (1990b)* und empfiehlt, das Laufband biologisch zu kalibrieren, um die Trainingssteuerung anhand der Laborergebnisse zu ermöglichen. Danach sollte die Durchführung des gleichen Testverfahrens mit denselben Probanden unter annähernd gleichen

Bedingungen auf der Test- und Trainingsstrecke erfolgen, um somit verschiedene Feldbedingungen durch Änderung des Anstiegswinkels auf dem Laufband zu projizieren. Nach *Heck (1990a)* wird die beste Simulation von Feldbedingungen bei Anstiegswinkeln zwischen 0 % und 2 % erreicht (vgl. Abb. 20).

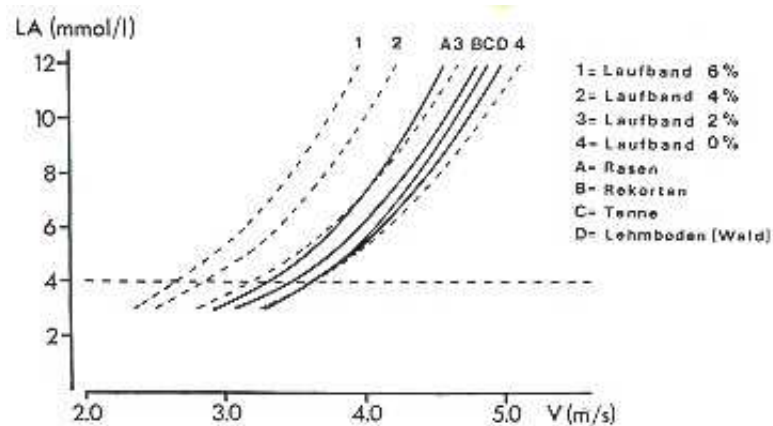


Abb. 20: Laktatverhalten bei Laboruntersuchungen auf dem Laufband mit unterschiedlichen Anstiegswinkeln und Laktatverhalten auf verschiedenen Laufböden in Abhängigkeit von der Laufgeschwindigkeit (*Heck et al., 1986*).

Weitere Unterstützung erhalten die Befunde von *Heck (1990a)* durch *Bueno (1990)*, welcher auf die Unverzichtbarkeit bezüglich der ergänzenden Begleitung von Labortests durch Feldtests aufmerksam macht.

### 3.2.6.3 Anpassung der LLK

Die „Anpassung der LLK“ durch mathematische Funktionen kann als eine sehr wesentliche Standardisierungsmaßnahme verstanden werden. Nur bei optimaler Angleichung der LLK an die tatsächlich vorherrschenden metabolischen Verhältnisse kann diese als Grundlage für die Auswertung und Steuerung von Training und Wettkampf dienen.

*Simon et al. (1981)* führten Untersuchungen durch, um festzustellen, durch welche mathematische Funktion das Laktatverhalten in Abhängigkeit von der Laufbandgeschwindigkeit am besten beschrieben werden kann. Die erhaltenen Befunde zeigen, dass durch Polynome dritter Ordnung nach der Form  $y(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d$  eine sehr genaue Beschreibung von Einzel- und Mittelwertkurven möglich ist. *Steuer, Hölthke & Jakob (2003)* untersuchten den Einfluss verschiedener Polynomgrade auf die IAS nach *Dickhuth et al. (1988)* und fanden heraus, dass der

Einfluss durch die Wahl des Polynomgrades fast zu vernachlässigen ist, allerdings nur wenn Polynomgrade von  $\leq 5$  gewählt werden. Weiterhin stellten *Steuer, Höltke & Jakob (2003)* in diesem Zusammenhang fest, dass der verwendete Polynomgrad von der Gesamtzahl der Stützpunkte insbesondere unterhalb der IAS nach *Dickhuth et al. (1988)* abhängig ist. Der Einfluss des gewählten Polynoms auf die IAS – Parameter ist jedoch nach ihrer Meinung sehr klein und wird in der Praxis häufig überschätzt. *Steuer, Höltke & Jakob (2003)* folgend wird im Gegensatz zu den Befunden von *Simon et al. (1981)* häufig ein Polynom vierter Ordnung bevorzugt.

*Pansold et al. (1982)* nutzen für die graphische Darstellung der Laktat – Leistungs – Beziehung eine Exponentialfunktion der Form  $y(x) = ae^{bx}$  und begründen dies mit der multiplen Abhängigkeit des Laktats von der Leistung, welche durch Reduktion auf einen Koeffizienten nur sehr ungenau beschrieben werden kann. Nach Auffassung von *Pansold, Zinner & Gabriel (1985)* hat sich die mathematische Beschreibung des alinearen Zusammenhangs von Belastungsintensität und Laktatkonzentration mit Hilfe der oben genannten Exponentialfunktion bewährt. Jedoch verwiesen *Zinner, Pansold & Buckwitz (1993)* in diesem Zusammenhang darauf, dass die Modellierung der LLK durch die Funktion  $y(x) = ae^{bx}$  nicht a priori gegeben ist und immer wieder Arbeiten auftauchen, die andere Kurvenanpassungen favorisieren.

Mit der Zielstellung, das Laktatverhalten in Abhängigkeit von der Belastung durch einen Funktionalzusammenhang beschreiben zu können, entwickelten *Hille & Geiger (1993)* ein weiteres mathematisches Modell. Danach kann mit Hilfe der Formel  $y(x) = a + be^{cx}$  und anschließender Regressionsanalyse der Daten die LLK sehr genau beschrieben werden. Somit besteht die Möglichkeit, eine optimale Anpassung an die Messwerte zu erzielen. Der Vorteil der beschriebenen Modellfunktion gegenüber dem polynomialen Ansatz (*Simon et al., 1981; Steuer, Höltke & Jakob, 2003*) zur Abbildung der LLK besteht nach *Hille & Geiger (1993)* darin, dass das Laktatverhalten sowohl innerhalb als auch außerhalb des Messbereiches biologisch zufrieden stellend beschrieben wird. Durch die Verwendung von Polynomen dritter und vierter Ordnung kann dies nicht gewährleistet werden. Auch im Vergleich zu der von *Pansold et al. (1982)* entwickelten Exponentialfunktion ist durch die Verwendung der Modellfunktion nach *Hille & Geiger (1993)* eine wesentlich bessere Regression der Messwerte möglich. Danach kommt es bei Verwendung der gewöhnlichen exponentiellen Regression (vorwiegend bei einer höheren Anzahl von Stufen) zur

ungenauen Beschreibung der Laktat – Leistungs – Beziehung, welche letztlich die korrekte Bestimmung von fixen und individuellen Schwellen verhindert und somit die Kontrolle und Steuerung des Trainings erschwert.

Der Anpassung von Exponentialgleichungen und Polynomen an die Laktat – Leistungs – Beziehung stehen *Pessenhofer & Schwabberger (1994)* sehr kritisch gegenüber und sprechen vor diesem Hintergrund von einer „Pseudoparametrisierung [...], da die so erhaltenen numerischen Beschreibungen den Mangel an Validität nur durch eine vorgetäuschte Genauigkeit überdecken.“ (*Pessenhofer & Schwabberger, 1994, 161*). Weitere Ausführungen bezüglich dieser Problemstellung erfolgen in Kapitel 3.2.7.

#### 3.2.6.4 *Spiro – Ergometrie vs. Ergometrie*

*Simon et al. (1985)* stellten sich die Fragen, inwieweit eine Übereinstimmung von Laktat, Atem- und Blutgasen während ansteigender Belastung besteht und ob durch die gleichzeitige Erhebung dieser methodisch unterschiedlichen Parameter eine Eingrenzung der aeroben und anaeroben Schwelle möglich erscheint. Die Befunde deuten darauf hin, dass metabolische Grenzsituationen durch eine kombinierte Messung von Atemgasen, Blutgasen und Laktat zuverlässiger erkannt werden können. Allerdings verwiesen *Simon et al. (1985)* in diesem Zusammenhang darauf, dass die Beobachtung der Verlaufsänderungen aller Parameter eher einen engen Grenzbereich als einen punktuellen Schwellenwert erkennen lässt. Nach *Heck & Hollmann (1985b)* kann die Registrierung von spirographischen Größen bei der Laufbandergometrie zusätzliche Informationen liefern. Allerdings wird der Proband beim Laufen behindert. Die Befunde von *Heck & Hollmann (1985b)* ermöglichen die Objektivierung dieser Einschränkung mit Hilfe des Parameters Laktat (vgl. Abb. 21). Aufgrund dieser Untersuchungsergebnisse vertreten sie die Auffassung, die Messung spiroergometrischer Parameter speziell wissenschaftlichen Fragestellungen vorzuenthalten und bei Routineuntersuchungen zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit auf die Anwendung eines Spirographen zu verzichten.

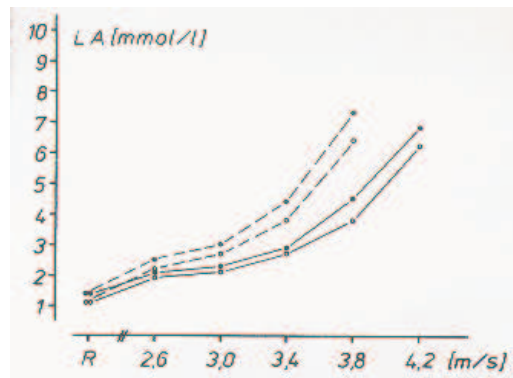


Abb. 21: Mittelwerte des Laktats in Abhängigkeit der Laufgeschwindigkeit für zwei verschiedene Laufbänder mit und ohne Nutzung eines Spirographen (Heck et al., 1982).

Die Aussage von *Hollman (1999)*, nach der bereits damals (*Anm.: ca. 1959*) die Bestimmung der LLK zuverlässiger als die der Ventilationskurve erschien, erfährt durch die Befunde von *Heck & Hollmann (1985b)* somit eine weitere wissenschaftliche Fundierung.

### 3.2.6.5 Testbedingungen

Ein Prüfverfahren, welches quantitative Aussagen über die Ausprägung von Persönlichkeitsmerkmalen ermöglichen soll, muss nach *Heck & Schulz (1999)* die Forderungen der Gütekriterien erfüllen. Obwohl dies nach ihren Erkenntnissen eine allseits bekannte Tatsache darstellt, wird den damit verbundenen Anforderungen in der sportmedizinischen Leistungsdiagnostik häufig nicht genügend Bedeutung beigemessen. Somit muss auch an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen werden, dass nur bei höchstmöglicher Standardisierung sowie Einhaltung grundlegender Verhaltensmaßnahmen durch Proband und Untersuchungsleiter den Zielstellungen leistungsdiagnostischer Untersuchungen entsprochen werden kann. In diese Richtung laufen die Vorstellungen von *Tschopp et al. (2001)*, welche zur Qualitätssicherung der sportmedizinischen Betreuung der Schweizer Olympiakader die Optimierung und Vereinheitlichung von Durchführungs- und Interpretationsrichtlinien in der Ausdauerleistungsdiagnostik anstreben. Um die Messgenauigkeit und damit die Qualität der Ergebnisse der LD zu sichern, ist es nach ihrer Auffassung notwendig, beeinflussende Faktoren wie die Testvorbereitung des Athleten, die Umgebungsbedingungen oder technische Prozeduren zu berücksichtigen und zu standardisieren. Weiterhin vermerken *Tschopp et al. (2001)*, dass durch die Auswahl geeigneter Testprotokolle und Beurteilungskriterien, die

Zielsetzungen der Ausdauerleistungsdiagnostik umgesetzt werden können. Eine testvorbereitende Standardisierungsmaßnahme ist nach *Braumann, Busse & Maassen (1987)* die Forderung, dass Leistungstests unter reproduzierbaren Bedingungen durchgeführt werden müssen. Sie empfehlen in diesem Zusammenhang, vor den anstehenden Untersuchungen für mindestens zwei Tage die gleichen Trainingseinheiten zu absolvieren. Nur unter der Prämisse möglichst identischer Testbedingungen besteht nach ihrer Auffassung die Chance, über eine Änderung der LLK konkrete Aussagen über die Effizienz einer Trainingsperiode zu treffen und Vorgaben grober Trainingsintensitätsbereiche abzuleiten. Abschließend sollen an dieser Stelle *Heck & Schulz (1999)* zu Wort kommen, welche auf Verbesserungsmöglichkeiten bezüglich der Gütekriterien in der sportmedizinischen LD aufmerksam machen. Sie verweisen auf einen geringen Aufwand im Bereich der Verbesserung der Objektivität, auf einen mittleren zur Verbesserung des Gütekriteriums Reliabilität und auf einen großen Aufwand bezüglich der notwendigen Erhebung von Norm- beziehungsweise Referenzwerttabellen. Allerdings wird von *Heck & Schulz (1999)* auch darauf hingewiesen, dass durch eine nationale beziehungsweise internationale Standardisierung der Belastungsschemata sowie der Messwerterhebung, die Vergleichbarkeit der Ergebnisse der sportmedizinischen LD und der abgeleiteten Trainingsempfehlungen ohne Aufwand erhöht werden könnten.

### **3.2.7 Modellierung biologischer Prozesse**

Im Folgenden soll der Versuch unternommen werden, die Befundlage bezüglich der theoretischen Betrachtung der Laktat – Leistungs – Beziehung darzustellen und in diesem Zusammenhang zu prüfen, in wie weit die Modellierung biologischer Prozesse und die daraus gewonnenen Ergebnisse die LLD qualitativ bereichern können. Um die eigentliche Idee von Modellierungsprozessen verstehen zu können, sollen nachfolgend *Mader, Heck & Hollmann (1981)* zitiert werden:

„Die allgemeine Systemtheorie und die Theorie der Regelung erlaubt es, komplexe technische und auch biologische Systeme durch einfachere Modelle abzubilden, so dass das Verhalten des realen Systems durch Simulation am Modell untersucht und näherungsweise durch ein System von Differentialgleichungen beschrieben werden kann.“ (*Mader, Heck & Hollmann, 1981, 70*).



Die eigentliche Notwendigkeit der theoretischen Beschreibung biologischer Prozesse ergibt sich nach diesen Autoren aus der Tatsache, dass wesentliche Parameter wie z. B. die tatsächlich produzierte Laktatmenge ohne Störung beziehungsweise Zerstörung lebender Systeme nicht oder nur unvollkommen gemessen werden können. Ihrer Auffassung folgend ist nur über die rechnerische Simulation der Prozesse die Gewinnung der notwendigen Erkenntnisse über das Verhalten nicht messbarer Parameter möglich. Weiterhin verweisen *Mader & Heck (1994)* darauf, dass der Sinn einer theoretischen Betrachtung darin besteht, die höhere Komplexität biologischer Prozesse mit angemessenen systemtheoretischen Methoden zu analysieren. *Mader (1994)* stellte in seinen Untersuchungen fest, dass die laktatbasierten Konzepte von einer direkten Bestimmung der leistungsrelevanten Kriterien ausgehen, welche jedoch nur einen Teil der komplexen Dynamik des muskulären Energiestoffwechsels repräsentieren. Die Befunde von *Mader (1994)* zeigten, dass die unmittelbare Interpretation der Messwerte keine korrekten Aussagen bezüglich der zu diagnostizierenden Aspekte des sportlichen Leistungsvermögens liefert. Nach seiner Ansicht könnte die Nachsimulation der Stoffwechseldynamik somit vor simplifizierenden Fehldeutungen schützen. Die rechnerische Simulation erlangt nach *Mader, Heck & Hollmann (1981)* weitere Bedeutung, da sie die Dynamik biologischer Systeme beschreiben und durch einen Vergleich mit real messbaren Parametern das blinde Experimentieren zunehmend ersetzen kann. Mit der Umsetzung dieser Philosophie könnte es möglich sein, die sportmedizinische Forschung aus dem von *Mader, Heck & Hollmann (1981)* beschriebenen, weitgehend nichttheoretischem Stadium herauszuführen. Ähnlich argumentiert auch *Mader (1994)* und stellt fest, dass die Einführung mathematischer Modelle zur Interpretation leistungsdiagnostischer Untersuchungen mehr Transparenz und Objektivität in die Beurteilung der gewonnenen Ergebnisse bringen kann. Die so gefilterten Informationen resultieren aus der Logik des Simulationsmodells und nicht aus der Subjektivität des Versuchsleiters. Die Modellierung biologischer Prozesse könnte außerdem der Reduktion der sportmedizinischen LD zur laktatdominierten LD vorbeugen, da nach *Bleicher, Mader & Mester (1998)* eine valide Interpretation der LLK einen Untersuchungsansatz erfordert, der mehrere Stoffwechselfparameter berücksichtigt.



Auch *Pessenhofer & Schwabeger (1994)* erkennen die Grenzen der laktatdominierten LD und kennzeichnen gleichzeitig die Potenzen von mathematischen Simulationen der Stoffwechseldynamik während ansteigender Belastungen. Sie empfehlen in diesem Zusammenhang eine Neuorientierung bei der Interpretation der LLK, welche sich an Modellvorstellungen der Laktatproduktion und –kinetik anlehnen sollte. Nach ihrer Auffassung müsste die Zielstellung darin bestehen, eine modellmäßige Implementierung der charakteristischen Prozesse Laktatproduktion, -diffusion und –elimination vorzunehmen, um letztlich ein verbindliches Standardmodell für die Repräsentation von Stufentests festzulegen. Als ursächlich für die von ihnen genannte Neuorientierung bei der Interpretation der LLK erscheinen Befunde, die zeigen, dass die Änderung des Stoffwechselfparameters Laktatdiffusion ( $K_1$ ) einen markanten Einfluss auf die LLK im Bereich der 4 mmol/l – Schwelle aufweist (vgl. Abb. 22, rechts). Eine Änderung des Parameters Aerober Fluss, welcher die eigentliche Messgröße des Stufentests darstellt, fand dabei nicht statt. Wird nun wie in der LLD durchaus üblich die 4 mmol/l – Schwelle als Testgröße für den Aeroben Fluss und damit als Indikator der aeroben Leistungsfähigkeit herangezogen, ergibt sich nach *Pessenhofer & Schwabeger (1994)* eine reduzierte Validität dieser Testgröße. Abb. 22 verdeutlicht, dass bezüglich der Interpretation einer tatsächlichen Verbesserung des Aeroben Flusses und einer Änderung der Laktatdiffusion Doppeldeutigkeiten entstehen können.

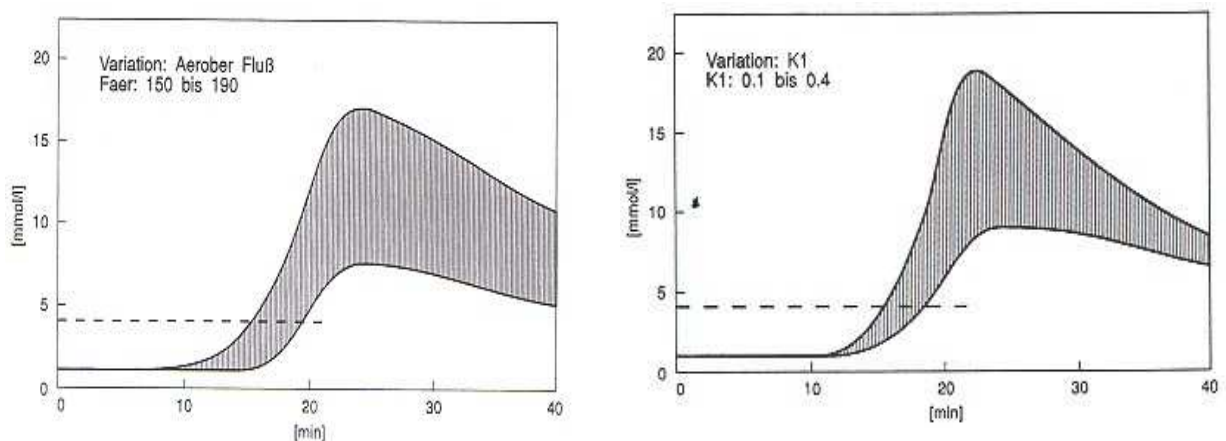


Abb. 22: Simulation der Stufentestergebnisse bei Variation des Parameters „Aerober Fluss“ sowie bei Variation des Parameters „Laktatdiffusion,  $K_1$ “ (*Pessenhofer & Schwabeger, 1994*).

Die pragmatische Philosophie der Modellierung von *Pessenhofer & Schwabeger (1994)* besteht nun darin, die experimentell erhobenen Messwerte mit den

Simulationsergebnissen bei einem bestimmten Startparametersatz zu vergleichen und die Parameter (Aerober Fluss, Laktatdiffusion, Laktatelimination) anschließend solange zu ändern, bis eine maximale Übereinstimmung der experimentellen Ergebnisse und der Simulation erreicht wird. Die so ermittelten Werte können nach *Pessenhofer & Schwabberger (1994)* als repräsentativ für den jeweiligen Probanden herangezogen werden. In einem weiteren Schritt müsste nach ihrer Auffassung versucht werden, Kausalbeziehungen zwischen speziellen Trainingsmaßnahmen und Änderungen der identifizierten Modellparameter zu erstellen, um gezielt in den Trainingsprozess eingreifen zu können.

## 4 Diskussion

### 4.1 Zur Problematik der Anwendung fixer und individueller Schwellen

In den folgenden Ausführungen soll der Versuch unternommen werden, die Vor- und Nachteile fixer und individueller Schwellen darzustellen sowie deren Praktikabilität zu diskutieren. Die Notwendigkeit dieser Betrachtung ergibt sich dabei aus der Feststellung, dass nach wie vor beide Schwellenparameter bei leistungsdiagnostischen Routineuntersuchungen zur Anwendung kommen. Außerdem ist der wissenschaftliche Diskurs bezüglich der Vor- und Nachteile keineswegs von Konformität geprägt, weshalb die kritische Auseinandersetzung mit der Problematik der Verwendung fixer und individueller Schwellen zusätzliche Brisanz erfährt.

#### 4.1.1 Dauerleistungsgrenze und maximales Laktat steady state (maxLass)

Wie in Kapitel 3.2.1 dargestellt, sollte die Leistung an einer Dauerleistungsgrenze immer relativ zur angestrebten variablen Länge der (Wettkampf-) Leistung angegeben werden (*Röcker & Dickhuth, 1996*). Ursächlich dafür erscheint die unterschiedliche metabolische Beanspruchung des Sportlers in Abhängigkeit von der Anforderungsstruktur der Wettkampfstrecke. *Neumann & Schüller (1994)* formulieren diesbezüglich, dass es nach modernen leistungsphysiologischen Vorstellungen keine einheitlichen Schwellen gibt. Außerdem hat sich nach ihrer Meinung die Arbeit mit individuellen Schwellen in der praktischen Trainingssteuerung bewährt. Dabei ist der von *Neumann & Schüller (1994)* genutzte Begriff der individuellen Schwelle nicht streng mit den verschiedenen Konzepten der IAS – Bestimmung in Verbindung zu bringen, sondern vielmehr mit einer spezifischen Abhängigkeit von der bestehenden metabolischen Beanspruchung des Athleten. Die Autoren verweisen darauf, dass die objektiven Anforderungen der Leistungsstruktur der jeweiligen Sportart eine Belastung in verschiedenen Intensitätsbereichen erfordern. Außerdem sollte das Training nach unterschiedlichen Schwellenkriterien (vgl. Tab. 1) und den zugeordneten Belastungsparametern Geschwindigkeit oder Leistung gestaltet und beurteilt werden.

Tab. 1: Anwendung unterschiedlicher Schwellenkriterien in Abhängigkeit der jeweiligen Anforderungen im Kurz-, Mittel- und Langzeitausdauerbereich (Neumann & Schüler, 1994).

Ausdauerbereich	Laktatschwellen in [mmol/l]				
	2	3	4	7	10
Kurzzeitausdauer (30 s – 2 min)			(X)	X	X
Mittelzeitausdauer (2 – 10 min)		(X)	X		
Langzeitausdauer 1 (10 – 30 min)		X	(X)		
Langzeitausdauer 2 (30 – 90 min)		X	(X)		
Langzeitausdauer 3 (90 – 360 min)	X	(X)			
Langzeitausdauer 4 (über 360 min)	X				

So bedeutet nach *Neumann & Schüler (1994)* die Verbesserung der Laufgeschwindigkeit bei 7 mmol/l Laktat eine Erhöhung des wettkampfspezifischen Niveaus im Mittelstreckenlauf. Für einen Marathonläufer erscheint dieses erhöhte Funktionsniveau jedoch uninteressant. Diese Problematik deutet nach meiner Auffassung auf die eingeschränkte Verwendung von Konzepten zur Bestimmung der aerob – anaeroben Schwelle hin. Außerdem zeigt sich, dass die maxLass – Leistung, welche durch die erhobene Schwellenleistung repräsentiert werden soll, einen Parameter darstellt, der einerseits diagnostische Bedeutung erlangt und Verlaufsbeobachtungen im Längsschnitt ermöglicht, jedoch andererseits in Abhängigkeit der Anforderungen der jeweiligen Ausdauerdisziplin in seiner trainingssteuernden und prognostischen Funktion deutlich begrenzt wird. Somit scheint speziell im Hochleistungsbereich die Notwendigkeit zu bestehen, komplexe Betrachtungen im Längsschnitt vorzunehmen und individuelle Auswertungsmodalitäten anzuwenden. Die eigenen Auffassungen gehen diesbezüglich mit denen von *Berbalk (2008, mündliche Mitteilung)* konform.

#### 4.1.2 Mittelwertangaben

Ein grundlegendes Problem im Umgang mit fixen und individuellen Schwellen sind statistische Mittelwertangaben. In der Veröffentlichung von *Mader et al. (1976)* wurde darauf hingewiesen, dass eine Laktatkonzentration von 4 mmol/l von den meisten Ausdauersportlern toleriert wird. Bei näherer Betrachtung der konkreten inhaltlichen

Bedeutung fällt jedoch auf, dass lediglich im Mittel Leistungen bei 4 mmol/l Laktat über eine längere Dauer erbracht werden können. Im Einzelfall treten allerdings nicht zu vernachlässigende, deutliche Abweichungen auf. Trotz allem wurde die an Mittelwertangaben orientierte Betrachtungsweise in der Folgezeit genutzt, um die experimentellen Befunde statistisch zu untermauern. Vor dem Hintergrund der individuellen Trainingssteuerung erlangt der gemittelte Schwellenwert nur im Einzelfall Bedeutung und sollte demzufolge kritisch hinterfragt werden. Genau diese Problematik führte nach der Veröffentlichung von *Mader et al. (1976)* zur Entwicklung zahlreicher Konzepte wie z. B. *Baldari & Guidetti (2000)*, *Braumann et al. (1991)*, *Bunc et al. (1982)*, *Cheng et al. (1992)*, *Dickhuth et al. (1988)*, *Griess et al. (1989)*, *Keul et al. (1979)*, *Pessenhofer, Schwabergger & Schmid (1981)*, *Simon, et al. (1981)* sowie *Stegmann, Kindermann & Schnabel (1981a)*. Mit ihrer Hilfe sollte die individuelle Belastungssteuerung optimiert werden. Allerdings verweisen *Heck, Hess & Mader (1985a)* sowie *Heck & Roszkopf (1994)* in diesem Zusammenhang darauf, dass der gemittelte (!) maxLass – Laktatwert bei ca. 4 mmol/l liegt. Nach ihrer Auffassung repräsentieren somit individuelle anaerobe Schwellen das maxLass nicht besser als die 4 mmol/l – Schwelle. Folglich erscheint die Trainingssteuerung mittels Schwellenwerten generell fragwürdig. *Berbalk (2008, mündliche Mitteilung)* vertritt in diesem Zusammenhang einen sehr pragmatischen Standpunkt und verweist darauf, dass am Institut für angewandte Trainingswissenschaften (IAT) in Leipzig vorrangig individuelle Auswertungsmodalitäten in der LLD zur Anwendung kommen. Schwellenwerte finden dabei kaum Verwendung. Begründet wird dies mit den spezifischen Anforderungen der jeweiligen Ausdauerdisziplin und mit der Möglichkeit, durch eine multifaktorielle und komplexe Betrachtung der leistungsdiagnostischen Ergebnisse im Längsschnitt, besser in die Trainingssteuerung eingreifen zu können.

Abschließend bleibt somit festzuhalten, dass Mittelwertangaben aus statistischer Sicht ihre Berechtigung haben, jedoch als alleiniger Steuerungsparameter für Training und Wettkampf im Einzelfall ungeeignet sind. Somit stellt die Erhebung eines Schwellenwertes immer nur ein steuerndes Element dar und sollte durch weitere Parameter ergänzt werden.

#### 4.1.3 Fix versus Individuell

Während der kritischen Analyse der verschiedenen Originalpublikationen und weiterer Beiträge zur Bestimmung der aerob – anaeroben Schwelle (vgl. Tab. 2, Tab. 4, Tab. 5) konnte festgestellt werden, dass im Verlauf der Entstehung der Konzepte Missverständnisse auftraten, welche nachfolgend zu Fehlinterpretationen führten. Bei Orientierung an feststehenden Gesetzmäßigkeiten wie der Abhängigkeit der Schwellenwerte vom Belastungsschema hätte sich ein Teil dieser Rückschlüsse weniger stark manifestieren können. An dieser Stelle soll nun versucht werden, die oben genannte Problematik aufzuzeigen und zu diskutieren.

Tab. 2: Originalpublikationen sowie angewendete Belastungsschemata bei der Laufbandergometrie.

Original- publikation	Laufbandergometrie						
	Anfangs- belastung		Stufe		Stufen- dauer	Laufband- steigung	BAG
	Km/h	m/s	Km/h	m/s	min	%	m/s/min
Mader et al., 1976		3		0,4	5,5	1 – 1,5	0,073
Kindermann, Simon & Keul, 1978	8		2		3	5	0,185
Keul et al., 1979	8		2		3	5	0,185
Simon et al., 1981	8		2		3	5	0,185
Stegmann & Kindermann, 1981b	8		2		3	5	0,185
Dickhuth et al., 1988	8		2		3	1,5	0,185

In Tab. 2 werden ausgewählte Originalpublikationen zur Bestimmung der aerob – anaeroben Schwelle inklusive der angewendeten Belastungsschemata aufgeführt. Neben unterschiedlichen Anstiegswinkeln ist eine differente BAG zu verzeichnen. Wie in Abschnitt 3.2.3.1 bereits dargestellt, zeigt jedoch jedes Schwellenkonzept eine Abhängigkeit vom Belastungsanstieg. So repräsentiert die *Mader* – Schwelle lediglich bei geringer BAG das maxLass im Mittel. Wenn nun Untersuchungen mit einer deutlich höheren BAG durchgeführt werden (vgl. Tab. 2), sollten sich deren Ergebnisinterpretationen nicht an der *Mader* – Schwelle orientieren, da diese nur bei einem definierten Testdesign Gültigkeit erlangt. Das Problem der unterschiedlichen Auswahl des Anstiegswinkels wird ebenfalls aus Tab. 2 ersichtlich. In Abschnitt 3.2.6.2 wurden diesbezüglich der Einfluss der Laufbandsteigung auf die

Laufökonomie und die physiologische Reaktion des Probanden erläutert. Diesen Gedankengängen folgend kann konstatiert werden, dass 1 – 1,5 % Steigung einen adäquaten Anstiegswinkel darstellen. Für eine Steigung des Laufbandes von 5 % sollte dies allerdings bezweifelt werden (vgl. Tab. 3). Die Erhebung statistischer Daten sowie die Aufzeichnung von Entwicklungen im Längsschnitt sind dadurch nach eigener Auffassung nicht gefährdet. Allerdings funktioniert der Transfer der erhobenen Daten in die Praxis nur eingeschränkt. Dies sollte bei der Interpretation der Ergebnisse und den nachfolgenden Ableitungen für die Belastungssteuerung beachtet werden.

Tab. 3: Vorrangig genutzte Steigungsprozente und zugehörige Winkelangaben des Laufbandes bei der LB – Ergometrie.

<b>sin <math>\alpha</math> in %</b>	1	1,5	2	5
<b><math>\alpha</math> in °</b>	0,57	0,86	1,15	2,87

Wie im Verlauf der Arbeit mehrfach erwähnt, sind vor allem die Arbeiten von *Heck, Hess & Rosskopf (1985a)* sowie *Heck (1990a, 1990b)* als wegweisend bezüglich der kritischen Auseinandersetzung mit der LLD einzuschätzen. Trotz allem wurden in der Folgezeit Studien mit beliebiger Auswahl des Testschemas durchgeführt (vgl. Tab. 4, Tab. 5), um anschließend Ableitungen zu treffen, welche nach heutigem Kenntnisstand als fragwürdig zu bezeichnen sind.

Tab. 4: Publikationen sowie angewendete Belastungsschemata bei der Laufbandergometrie.

<b>Publikation</b>	<b>Laufbandergometrie</b>						
	Anfangsbelastung		Stufe		Stufendauer	Laufbandsteigung	<b>BAG</b>
	Km/h	m/s	Km/h	m/s	min	%	m/s/min
Simon et al., 1985		2,5		0,25	3	1,5	0,083
Hedtkamp, Götte & Zipf, 1985	10		2		3	1	0,185
Rieder, Kullmer & Kindermann, 1987b		3		0,5	3	1,5	0,166
Urhausen et al., 1993		2,5/3		0,5	3	1,5	0,166
Coen, 1997		2,5/3		0,5	3	1,5	0,166



Tab. 5: Publikationen sowie angewendete Belastungsschemata bei der Fahrradergometrie.

Publikation	Fahrradergometrie			
	Anfangs- belastung	Stufe	Stufendauer	BAG
	Watt, [W]	Watt, [W]	min	W/min
Stegmann & Kindermann, 1982	50/100	50	2	25
Urhausen, Weiler & Kindermann, 1992	100	50	3	16,66
Urhausen et al., 1993	100	50	3	16,66

Die Publikationen von *Urhausen, Weiler & Kindermann (1992)* sowie *Urhausen et al. (1993)* können diesbezüglich als repräsentativ angesehen werden. Es fällt auf, dass von den genannten Autoren der Versuch unternommen wird, das angewendete IAS – Konzept nach *Stegmann, Kindermann & Schnabel (1981a)* mit einer hohen BAG zu validieren, um damit die Überlegenheit der IAS gegenüber der 4 mmol/l – Schwelle von *Mader et al. (1976)* nachzuweisen. In diesem Zusammenhang sollte allerdings darauf hingewiesen werden, dass bei Anwendung eines Belastungsschemas mit geringer BAG gegenteilige Befunde entstehen würden. Aus diesem Grund konstatierte *Heck (1990a)* für die Fahrradergometrie, dass die erhobenen Schwellenwerte nach *Stegmann & Kindermann (1981b)* nur für ein Testprotokoll mit einer BAG von 25 W/min Gültigkeit besitzen. Die konsequente Einhaltung dieser Empfehlungen hätte in der Folgezeit wissenschaftliche Anstrengungen kanalisieren können. *Heck & Roskopf (1994)* formulierten dazu folgendes:

„Damit würde auch die Notwendigkeit entfallen, das «eigene» Schwellenkonzept als die «wahre Schwelle» zu beweisen. Die dadurch frei werdenden wissenschaftlichen Ressourcen könnten unter neuem «Blickwinkel» trainingswissenschaftlichen Fragestellungen zugeführt werden. Weiterhin dürfte es dann einfacher sein, sich auf ein einheitliches, auf die Sportpraxis bezogenes Testschema zu einigen, da die spezifischen Testbedingungen der «eigenen Schwelle» nicht mehr existent sind.“ (*Heck & Roskopf, 1994, 127*).

Einerseits geht die eigene Auffassung mit dieser Formulierung konform, allerdings sollte andererseits auch darauf verwiesen werden, dass unter den Prämissen

wesentlicher Standardisierungsgrundsätze vor und während der Durchführung der LLD und einer kompetenten wissenschaftlichen Interpretation der Ergebnisse die Nutzung der aerob – anaeroben Schwelle unabhängig von ihrer Bestimmungsmethode als sinnvoll erachtet werden kann.

Ein wesentlicher Punkt, welcher für die grundsätzliche Überlegenheit individueller im Vergleich zu fixen Konzepten sprechen könnte, ist die Berücksichtigung der Laktatkinetik bei Erhebung des Parameters IAS (*Röcker et al., 1997*). Auch wenn die 4 mmol/l – Schwelle das maxLass im Mittel korrekt wiedergibt, bleibt die individuelle Dynamik der Laktat – Leistungs – Beziehung, aufgrund der Bestimmungsmethode, unberücksichtigt. Das Schwellenkonzept nach *Dickhuth et al. (1988)* verdeutlicht ebenfalls diese Problematik. Neben dem variablen Basislaktat findet eine fixe Konstante Anwendung, die den individuellen Gegebenheiten jedoch nur unzureichend gerecht werden kann, da der Verlauf der LLK in diesem Bereich keineswegs von Konformität geprägt ist.

Zusammenfassend soll dem Literaturstand folgend auf die Vorteile individueller Konzepte verwiesen werden. Der teilweise kontroverse Forschungsstand auf diesem Gebiet erlaubt jedoch keine allgemeingültigen Aussagen. Die Bestimmung der aerob – anaeroben Schwelle kann folglich immer nur einen Baustein im komplexen Gefüge sportmedizinischer und trainingswissenschaftlicher Facetten darstellen.

#### **4.1.4 Bevorzugt angewendete Schwellenkonzepte**

Interessant ist die Tatsache, dass die in Tab. 6 aufgeführten leistungsdiagnostischen Standorte mehrheitlich die Schwelle nach *Dickhuth et al. (1988)* zur Auswertung der LLK nutzen. Vor dem Hintergrund, dass dieses Schwellenmodell eine Abhängigkeit von den Kriterien Belastungsschema, Ernährung, Vorbelastung sowie Anfangsbelastung (vgl. Tab. 7) aufweist, ist dies nach eigener Auffassung eine erstaunliche Feststellung. Der Grund hierfür könnte in der einfachen Bestimmung der *Dickhuth* – Schwelle zu finden sein. Aus sportmedizinischer und trainingswissenschaftlicher Sicht erscheint dies jedoch fragwürdig. Weiterhin fällt auf, dass verschiedene Standorte neben einer klassischen Schwellenerhebung mit Hilfe der aufgeführten Konzepte eigene Modi entwickelt haben, um die Informationen der LLD in den Trainingsprozess zu überführen. Unter leistungssportlichen

Gesichtspunkten ist dieser Weg als adäquat zu bewerten, da die LLD immer nur eine Komponente in der Auswertung und Steuerung von Training und Wettkampf repräsentieren kann. Diese Feststellung untermauern *Gaisl et al. (1980)* mit dem Hinweis, dass der Bereich des aerob – anaeroben Übergangs lediglich geeignet ist, um mit dem geringsten Trainingsaufwand den größtmöglichen Effekt zu erzielen. Diese Gesetzmäßigkeit erscheint für den mäßig bis nicht trainierten Probanden ausreichend zutreffend. Im Spitzensport hingegen sollte diese Aussage nach eigener Auffassung relativiert und aufgrund der notwendigen Belastungen im Grenzbereich der Anpassungsreserve durch weitere spezifische Parameter ergänzt werden.

Tab. 6: Verschiedene leistungsdagnostische Standorte Deutschlands mit Zuordnung des angewendeten Schwellenkonzepts beziehungsweise anderer Modi.

Standort	Schwellenkonzept				
	Mader	Dickhuth	Stegmann & Kindermann	Keul, Simon	Andere Modi
XP - Sport		X (modifiziert)			
Zeld, DSHS Köln	X				
Klinikum Nürnberg Süd		X			
Uni Tübingen		X			
Sportkrankenhaus Hellersen		X			X
SMS – Berlin		X			X
Pro – Formance	X	X			
Protraining – Sports		X			
IAT					X
Finisherconcepts					X
FSU Jena			X		

Abschließend sollte allerdings auch darauf hingewiesen werden, dass nur wenige Informationen bezüglich der leistungsdagnostischen Standorte und der dort angewendeten Schwellenkonzepte verfügbar und zugänglich sind. Eigene schriftliche Befragungen der aufgeführten Institute ergaben eine sehr geringe Rücklaufquote. Von den ca. 70 leistungsdagnostischen Standorten in ganz Deutschland, die von mir

kontaktiert wurden, zeigte nur ein Bruchteil davon die Bereitschaft, über das angewendete Schwellenkonzept oder andere Auswertungsmodi zu informieren. Verallgemeinerungswürdige Aussagen scheinen auf dieser Basis kaum zulässig zu sein.

#### 4.2 Zur Problematik der Abhängigkeit von beeinflussenden Kriterien

Im Folgenden wird der Versuch unternommen, die Abhängigkeit der bevorzugt angewendeten Schwellenkonzepte von ausgewählten Kriterien zu verdeutlichen und daraus resultierende Schlussfolgerungen kontrovers zu diskutieren. Zur Visualisierung dieser Problematik kann die Tab. 7 genutzt werden, in der die Schwellenkonzepte von *Mader et al. (1976)*, *Keul et al. (1979)*, *Simon et al. (1981)*, *Dickhuth et al. (1988)* und *Stegmann & Kindermann (1981b)* sowie die beeinflussenden Variablen aufgeführt sind.

Tab. 7: Einfluss bestimmter Kriterien auf die durch verschiedene Schwellenkonzepte erhobene Leistung / Geschwindigkeit an der aerob – anaeroben Schwelle.

Schwellenleistung abhängig von ...	Schwellenkonzept			
	Mader	Keul, Simon	Stegmann & Kindermann	Dickhuth
1) Belastungsschema / Testdesign	X	X	X	X
2) Ernährung / Glykogenspeicher	X			X
3) Vorbelastung				X
4) Ausbelastung			(X)	
5) Trainingszustand	(X)			
6) Dimension der Geschwindigkeit		X		
7) Anfangsbelastung				X

Im Anschluss sollen folgende Kriterien exemplarisch diskutiert werden:

- Belastungsschema / Testdesign,
- Ausbelastung und
- Trainingszustand.

Wie bereits in Kapitel 3.2.3.1 dargestellt, weisen alle Schwellenkonzepte eine Abhängigkeit vom Belastungsschema auf. Offensichtlich kann dieses Kriterium nicht zur qualitativen Abgrenzung der verschiedenen Modelle beitragen. Allerdings sollte in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen werden, dass die *Stegmann* – Schwelle bei der Fahrradergometrie mit einer BAG von 25 W/min das maxLass im Mittel repräsentiert. Außerdem stellte *Heck (1990a)* für Laufbanduntersuchungen fest, dass die *Stegmann* – Schwelle in einem Belastungsanstiegsbereich von 0,10 – 0,15 m/s/min invariant zu sein scheint. *Heck (1990a)* konnte zusätzlich nachweisen, dass mit Hilfe von Korrekturgleichungen die Abhängigkeit der Schwellenwerte von der BAG kompensiert werden kann. Somit besteht die Möglichkeit bei verschiedenen BAG die Schwellen nach *Bunc et al. (1982)*, *Keul et al. (1979)*, *Mader et al. (1976)* sowie *Stegmann, Kindermann & Schnabel (1981a)* mit dem maxLass in Übereinstimmung zu bringen. Aus meiner Sicht weist jedoch die *Stegmann* – Schwelle bezüglich des Kriteriums Belastungsschema / Testdesign, aufgrund ihrer Übereinstimmung mit dem maxLass bei definierter BAG, die höchste Praxistauglichkeit auf.

Die mögliche Abhängigkeit der *Stegmann* – Schwelle vom Grad der Ausbelastung (vgl. Tab. 7) ist damit zu erklären, dass ausschließlich bei Auftreten eines Laktatüberhangs in der Nachbelastungsphase die zeichnerische Bestimmung der IAS möglich ist. Existiert dieser Überhang nicht, kann nur mit Hilfe computergestützter Auswertungsprogramme oder erfahrungsgestützter Betrachtung der gesamten LLK ein Schwellenwert erhoben werden. Daraus wird meiner Auffassung nach ersichtlich, wie immanent bedeutsam ein hoher Ausbelastungsgrad ist, da computer- und erfahrungsgestützte Arbeitsweisen die Streuung der Ergebnisse erhöhen und ergo deren Zuverlässigkeit zusätzlich einschränken.

Ein Einfluss des Trainingszustandes auf die *Mader* – Schwelle ist nur unter der Prämisse der Gültigkeit des u. a. von *Keul et al. (1979)*, *Simon et al. (1981)* sowie *Pessenhofer, Schwaberg & Schmid (1981)* postulierten Anpassungsphänomens (vgl. 3.2.4) wahrscheinlich. Da dieses jedoch sehr kontrovers diskutiert wird und kein wissenschaftlicher Konsens diesbezüglich zu verzeichnen ist, wird in Tab. 7 nur eine mögliche Abhängigkeit vom Kriterium Trainingszustand dargestellt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass alle in Tab. 7 aufgeführten Schwellenkonzepte Abhängigkeiten von bestimmten Kriterien aufweisen. Um jedoch

eine praxisbezogene Ableitung im Sinne einer qualitativen Rangordnung der Schwellenkonzepte vornehmen zu können, wäre eine Quantifizierung des Einflusses notwendig. Ein derartiger Beitrag kann aus meiner Sicht nur durch eingehende Literaturrecherche in Verbindung mit einer experimentellen Untersuchung geleistet werden. Trotz allem soll an dieser Stelle auf Basis des aktuellen Literaturstandes darauf hingewiesen werden, dass das Schwellenkonzept von *Stegmann, Kindermann & Schnabel (1981a)* offensichtlich die geringste Abhängigkeit von den aufgeführten Kriterien aufweist (vgl. Tab. 7). Bei entsprechender Auswahl des Belastungsschemas zur Durchführung der Untersuchung sowie unter der Prämisse der höchstmöglichen Standardisierung erscheint dieses Modell anderen Schwellenkonzepten überlegen zu sein. Allerdings besteht bei Beachtung der in Tab. 7 aufgeführten Abhängigkeiten und der Einhaltung grundlegender Verhaltensmaßnahmen auch für die anderen Auswertungsverfahren die Möglichkeit, praktikable Ableitungen für die Trainings- und Wettkampfsteuerung zu erstellen.

#### **4.3 Zur Problematik des postulierten Anpassungsphänomens**

Die Ursachen für die Entstehung des Postulats und der damit einhergehende wissenschaftliche Diskurs wurden in Abschnitt 3.2.4 dargestellt. Auch bei dieser Fragestellung konnte festgestellt werden, dass sich Gegner und Befürworter des Anpassungsphänomens deutlich voneinander abgrenzen und versuchen, den eigenen Standpunkt durch experimentelle Studien zu belegen. Da die aerob – anaerobe Schwelle nach Auffassung von *Stegmann & Kindermann (1981b)*, *Simon et al. (1985)* sowie *Heck, Hess & Mader (1985a)* großen interindividuellen Schwankungen unterliegt, bleibt festzuhalten, dass die Auseinandersetzung mit dieser Anpassungserscheinung für die Trainingssteuerung keinen Zugewinn bedeutet. Es soll nochmals darauf hingewiesen werden, dass Messergebnisse, welche im Mittel die angeführte Tendenz repräsentieren, lediglich aus statistischer Sicht verwertbar sind. Spezielle Einzelfälle gilt es stets kritisch zu hinterfragen.

Durch die Analyse der eigenen leistungsdiagnostischen Untersuchungsergebnisse kann dieser Sachverhalt untermauert werden. Selbst durch ein langjähriges Radtraining mit Jahresumfängen von ca. 25 000 km lag der Laktatwert an der aerob – anaeroben Schwelle relativ stabil über 4 mmol/l. Der Schwellenlaktatwert wurde zusätzlich durch einen Dauertest zur maxLass – Bestimmung validiert. Dabei

konnten nach 10 beziehungsweise 20 min eines 400 W - Dauertests Laktatkonzentrationen von 4,65 beziehungsweise 4,51 mmol/l bestimmt werden. Somit ist nach den gültigen Definitionen für die Annahme einer maxLass – Belastung zumindest ein Lass zu verzeichnen. Aus meiner Sicht wird damit der dargestellte Sachverhalt eindrücklich dokumentiert.

Ein weiteres Problemfeld eröffnet sich, wenn der Auffassung von *Braumann, Busse & Maassen (1987)* gefolgt wird. Danach ist für die flache, nach rechts verschobene LLK möglicherweise eine latente Glykogenverarmung der Muskulatur hochtrainierter Ausdauersportler mitverantwortlich. Speziell die Bestimmungsverfahren nach *Keul et al. (1979)*, *Simon et al. (1981)* sowie *Stegmann & Kindermann (1981b)* würden bei Nichtbeachtung des Ernährungszustandes dazu führen, die Ergebnisse der LLD im Sinne einer Abnahme der Laktatkonzentration an der Schwelle zu interpretieren. Erfolgt ein laktatgesteuertes Training in normalem beziehungsweise glykogenreichem Zustand, wäre eine metabolische Unterforderung die Folge und angestrebte Trainingsziele könnten somit verfehlt werden.

#### **4.4 Zur Problematik des Transfers von der Theorie in die Praxis**

Ein höchstmöglicher Transfer der Labor- und Feldtestergebnisse in die Trainings- und Wettkampfpraxis kann sicherlich als übergeordnete Zielstellung in der Zusammenarbeit zwischen Wissenschaftlern, Trainern und Athleten angesehen werden. Aus diesem Grund soll in den nachfolgenden Betrachtungen die Problematik eines praxisorientierten Transfers diskutiert werden, um letztlich Maßnahmen abzuleiten, welche eine zuverlässige Trainings- und Wettkampfsteuerung ermöglichen könnten.

Die Auswahl zwischen Labor- oder Felduntersuchung erscheint von grundsätzlicher Bedeutung zu sein. Einerseits bestehen im Labor günstige Voraussetzungen zur Standardisierung der Rahmen- und Durchführungsbedingungen, andererseits sind Feldtests praxisnäher. Daraus ergibt sich allerdings eine eingeschränkte Zuverlässigkeit im Vergleich zu Laboruntersuchungen, aufgrund der Variabilität der äußeren Bedingungen. Letztendlich entscheiden über das anzuwendende Untersuchungsdesign die jeweiligen Zielstellungen und Interessen von Trainer und Athlet. Die vorrangigen Aufgaben der begleitenden Sportmediziner und



Trainingswissenschaftler sind neben der korrekten Durchführung der Untersuchung, die kompetente und wissenschaftlich fundierte Interpretation der erhaltenen Testergebnisse.

#### **4.4.1 Validierung der ermittelten Schwelle**

Als wesentlicher Schwerpunkt im Spannungsfeld des Transfers von der Theorie in die Praxis kann die Validierung des ermittelten Schwellenwertes angesehen werden. Auch wenn die Autoren und Anwender der verschiedenen Schwellenmodelle das jeweilige Konzept als adäquat bezüglich der Repräsentation des maxLass betrachten, konnte in den bisherigen Ausführungen gezeigt werden, wie anfällig die Schwellenkonzepte gegenüber beeinflussenden Parametern sind. Grundsätzlich wäre die Simplifikation des leistungsdiagnostischen Aufwands in Form der Durchführung eines Stufentests mit Ableitung von Schwellenwerten und Trainingsbereichen wünschenswert. Eigene Erfahrungen weisen jedoch eher auf die eingeschränkten Einsatzmöglichkeiten der ausschließlichen Betrachtung der Stufentestergebnisse hin. Aus diesem Grund sollten sich leistungsdiagnostische Untersuchungen den Forderungen von *Van Schuylenbergh, Vanden Eynde & Hespel (2004)* sowie *Weicker & Braumann (1994)* verpflichtet fühlen, nach denen der mittels stufenweise ansteigender Belastung erhobene aerob – anaerobe Schwellenwert nur dann Gültigkeit besitzt, wenn er durch einen Dauertest von 30 – 40 min verifiziert wurde. Auch wenn der logistische und materialtechnische Aufwand für die Durchführung eines maxLass – Tests vergleichsweise hoch erscheint, sollte speziell im Spitzensport das Bewusstsein dafür vorhanden sein, dass nur durch eine derartige Validierungsmaßnahme die zuverlässige Trainings- und Wettkampfsteuerung mit Hilfe des aerob – anaeroben Schwellenparameters ermöglicht werden kann.

Abschließend wird nochmals darauf verwiesen, dass für das Zusammenspiel von LLD und Trainingssteuerung verschiedene Schwellenkonzepte brauchbar sind. Allerdings besteht die Notwendigkeit, die erhobenen Parameter ausreichend wissenschaftlich abzusichern und diese unter Feldbedingungen und in der Trainingspraxis zu validieren. Eigene Auffassungen unterstützen diese von *Coen (1997)* getroffenen Feststellungen. Danach können nur die beschriebenen adäquaten

Verhaltensmaßnahmen einen tatsächlichen Beitrag zur Optimierung von Training und Wettkampf leisten.

#### **4.4.2 Prognose von Wettkampfleistungen**

Eine besondere Legitimation erlangt die Bestimmung der aerob – anaeroben Schwelle durch die Möglichkeit, Wettkampfleistungen oder Laufgeschwindigkeiten in Langstreckenwettbewerben zu prognostizieren (*Föhrenbach et al., 1985; Rieder, Weiler & Kindermann, 1987a; Röcker et al., 1997*). Aus meiner Sicht ein sehr entscheidender Gesichtspunkt, da an dieser Stelle die aus der LLD abgeleiteten Empfehlungen unmittelbar verwertbar erscheinen. Die Prognose von Wettkampfleistungen erfolgt dabei auf der Grundlage von Geschwindigkeiten. Allerdings sollten zwei Problemfelder Berücksichtigung finden. Zum einen ist die Anwendung beziehungsweise Durchführung eines Tests zur Tempovorgabe erst auf sehr langen Laufdistanzen als sinnvoll zu erachten (*Röcker et al., 1997*), da erst im Langzeitausdauerbereich die Geschwindigkeit an der aerob – anaeroben Schwelle als valides Bezugskriterium angesehen werden kann. Zum anderen ist die unter standardisierten Bedingungen erhobene Schwellengeschwindigkeit an die Wettkampfsituation anzupassen. Ein durchaus schwieriger Prozess, da Größen wie Motivation, Eigendynamik des Wettbewerbs, Profilierung der Laufstrecke u. a. entscheidenden Einfluss nehmen können. Vor diesem Hintergrund sind die Befunde von *Rieder, Weiler & Kindermann (1987a)* zu interpretieren, nach denen die Marathonzeiten eng mit der Leistungsfähigkeit an der anaeroben Schwelle korrelieren und die Laufgeschwindigkeiten im Bereich der IAS nach *Stegmann, Kindermann & Schnabel (1981a)* liegen. Damit ist die Wettkampfzeit über die Bestimmung der IAS relativ gut abzuschätzen. Eigene Beobachtungen bei einer Spitzenathletin im Bereich Duathlon / Triathlon sowie umfangreiche Forschungsergebnisse von *Berbalk (2008, mündliche Mitteilung)* können diese Befunde bestätigen.

#### **4.4.3 Trainings- und wettkampfsteuernde Parameter**

Unter der Prämisse der Validität der aus der LLK abgeleiteten Schwellenwerte und Trainingsbereiche erlangt die Auswahl der trainings- und wettkampfsteuernden

Parameter Herzfrequenz, Laktatkonzentration, Leistung oder Geschwindigkeit eine entscheidende Bedeutung. Nur durch die gezielte Entscheidung für den jeweiligen Parameter und den kompetenten Umgang mit diesem kann seine steuernde Funktion genutzt werden. Aus meiner Sicht erscheint es nicht sinnvoll, nur einer trainingsleitenden Messgröße zu vertrauen. Vielmehr ist es notwendig, in Abhängigkeit der inhaltlichen Aufgabenstellung von Training und Wettkampf die Parameter Herzfrequenz, Laktatkonzentration, Leistung oder Geschwindigkeit variabel einzusetzen, um somit deren Nutzen zu optimieren. *Neumann (1994)* spricht diesbezüglich von einer spezifischen Indikation der jeweiligen Parameter. Die Trainingssteuerung in Abhängigkeit der Belastungsintensität und der damit einhergehenden unterschiedlichen Trennschärfe der Messgrößen Herzfrequenz und Laktatkonzentration vorzunehmen, empfiehlt *Coen (1997)*. Aufgrund der multiplen Abhängigkeit der genannten biologischen Messgrößen von verschiedenen Einflussgrößen wie Tageszeit, Ernährungszustand, Motivation, Umgebungstemperatur u. a. erscheint der unkritische Umgang mit diesen Größen allerdings problematisch. Eigene Erfahrungen und die Beobachtung von Spitzensportlern können diese Tatsache bestätigen. Dabei fällt auf, dass Herzfrequenz und Laktatkonzentration nur punktuell genutzt werden. In Einzelfällen wird fast vollständig auf diese steuernden Parameter verzichtet. Allerdings sollte an dieser Stelle auch angemerkt werden, dass eine solche Vorgehensweise nur sehr erfahrenen Athleten vorbehalten ist. *Weicker & Braumann (1994)* verweisen in diesem Zusammenhang darauf, dass zusätzliche Parameter wie  $VO_2\text{max}$ , Respiratorischer Quotient (RQ) und Ammoniak dazu dienen können, die Genauigkeit der aus der LLK abgeleiteten Trainingsempfehlungen zu erhöhen. Eine aus meiner Sicht sehr sinnvolle Empfehlung, welche jedoch ein funktionierendes Netzwerk aus sportmedizinischer Betreuung und trainingsmethodischer Umsetzung voraussetzt.

Speziell im Hochleistungsbereich erfolgt in der Regel die zusätzliche Nutzung physikalischer Steuergrößen wie Leistung und Geschwindigkeit. Durch die Messung der physikalischen Leistung beim wattgesteuerten Radtraining kann der Beanspruchungsgrad des Probanden durch Rückkopplung zu den Belastungsempfehlungen aus der LLD relativ genau abgeschätzt werden (*Kettmann & Huber, 1994*). Der Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der LLD und der Trainings- und Wettkampfsteuerung mittels physikalischer Parameter erscheint enger

als bei biologischen Messgrößen, da eine nur geringe Abhängigkeit der physikalischen Einheiten W und m/s (km/h) von den genannten Einflussgrößen Tageszeit, Ernährungszustand, Motivation, Umgebungstemperatur u. a. besteht. Ein Blick auf die zurzeit vorherrschende Praxis in der Belastungssteuerung des Radtrainings im Spitzensport zeigt, dass die Vermutung von *Stockhausen et al. (1994)*, wonach die kontinuierliche Leistungsmessung auf dem Rad zunehmende Bedeutung erlangen wird, Realität geworden ist. Allerdings sollte auch in diesem Fall die Dynamik biologischer Systeme Beachtung finden und aus diesem Grund auf eine dogmatische Umsetzung der Ableitungen aus der LLD verzichtet werden.

Zusammenfassend kann konstatiert werden, dass sich biologische und physikalische Parameter zur Trainings- und Wettkampfsteuerung sinnvoll ergänzen. Über einen alternierenden Einsatz ist es möglich, einen Großteil der Potenzen steuernder Parameter zu nutzen. Allerdings ist auch darauf zu achten, dass keine ausschließliche Anwendung der aufgeführten Messgrößen erfolgt, da sonst die Parametersteuerung zum Parameterwahn verkommt. Der Blick auf andere wesentliche Aspekte von Training und Wettkampf wie z. B. Vermeidung von Monotonie, intrinsische Leistungsmotivation, taktische Zwänge im Wettkampf u. a. wird dadurch verstellt.

#### **4.5 Zur Problematik grundlegender Standardisierungsmaßnahmen**

Den grundlegenden Standardisierungsmaßnahmen kommt vor dem Hintergrund der Gesamtvariabilität der Ergebnisse der LLD (vgl. 3.2.5) eine außerordentlich hohe Bedeutung zu. Dieser Tatsache sollten sich nach eigener Auffassung Untersucher und Probanden nicht nur bewusst sein, sondern auch unterordnen. Nur so können die Potenzen der erhobenen Messwerte für die Trainingsbeurteilung und –steuerung ausgeschöpft werden. In diesem Zusammenhang ist es außerdem wichtig, eine hochgradig spezifische Ergometrie durchzuführen. Da diese Forderung in Bezug auf Laboruntersuchungen durch die Aussage von *Bachl et al. (1994)*, wonach die Nutzung von Spezialergometern allenfalls als semispezifisch angesehen werden kann, eingeschränkt wird, sollte die Bedeutung von Felduntersuchungen hervorgehoben werden. Der erhöhte logistische Aufwand sowie die bestehenden Probleme bezüglich der Standardisierung der Umgebungsbedingungen bei wiederholter Testdurchführung machen es notwendig, eine intensive

Auseinandersetzung mit den Zielstellungen der leistungsdiagnostischen Untersuchung zu vollziehen.

Aufgrund der Erkenntnisse bezüglich der Anpassung der LLK an die tatsächlich vorherrschende metabolische Situation (vgl. 3.2.6.3) erscheint es unverständlich, weshalb keine einheitliche Modellfunktion zur Beschreibung des Laktatverhaltens bei Stufentests zur Anwendung kommt. Auch an dieser Stelle liegt der Verdacht nahe, dass eher versucht wird, die eigene mathematische Funktion zu begründen und zu legitimieren, ohne sich der übergeordneten Aufgabenstellung der bestmöglichen Anpassung unterzuordnen.

#### **4.6 Zur Problematik der Modellierung biologischer Prozesse**

Die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit der Modellierung biologischer Prozesse hat eine lange Tradition (*Mader, Heck & Hollmann, 1981; Pessenhofer et al., 1987*). Bei Betrachtung der gegenwärtigen Situation in der LLD kann jedoch festgestellt werden, dass das von *Mader, Heck & Hollmann (1981)* beschriebene nichttheoretische Stadium der sportmedizinischen Forschung größtenteils Bestand hat, da experimentelle Untersuchungen und daraus hervorgehende Ableitungen den wesentlichen Bestandteil der LLD darstellen. Aus dieser Problemstellung heraus sollen im Folgenden die möglichen Potenzen der theoretischen Betrachtung biologischer Prozesse skizziert und diskutiert werden.

*Mader (1994)* verwies auf die Gefahr von simplifizierenden Fehldeutungen bezüglich der Ergebnisse der LLD und konstatierte in diesem Zusammenhang, dass selbst eine umfangreiche statistische Analyse der Messwerte nicht die strenge naturwissenschaftliche Theorie ersetzen kann. Belegt wird dies anhand von Resultaten der Nachsimulation der Stoffwechseldynamik, welche zeigen, dass die offensichtliche und unmittelbare Interpretation der Ergebnisse der LLD keine korrekten Aussagen über die relevanten Parameter der metabolischen Beanspruchung ermöglicht (vgl. Abb. 23). Es zeigt sich, dass bei einem Vergleich der LLK I und II die auftretende Rechtsverschiebung durch die Abnahme der glykolytischen Leistung (repräsentiert durch die maximale Laktatbildungsgeschwindigkeit,  $V_{Lamax}$ ) hervorgerufen wird und nicht durch eine Zunahme der aeroben Leistungsfähigkeit ( $VO_{2max} = \text{konstant}$ ). Nach *Mader (1994)*

ist ein erfolgreiches Ausdauertraining genau durch dieses Verhalten gekennzeichnet. Seiner Auffassung folgend, resultieren die Aussagen aus der Logik des mathematischen Modells und sind somit nicht von der Subjektivität des Untersuchers abhängig. Die Einführung mathematischer Modelle zur Interpretation leistungsdiagnostischer Untersuchungen könnte somit mehr Transparenz und Objektivität in die Beurteilung der gewonnenen Ergebnisse bringen.

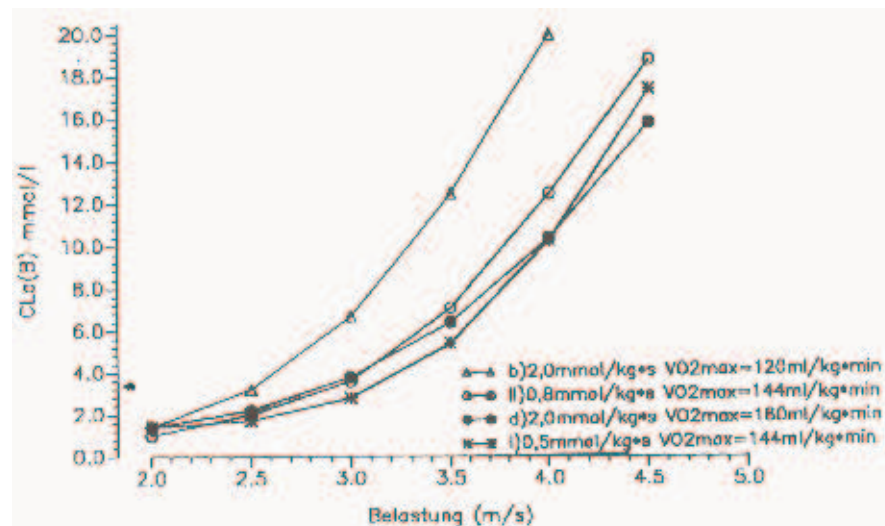


Abb. 23: LLK für verschiedene Parametersätze. B und d repräsentieren die Stoffwechselverhältnisse der Probandengruppen aus der Publikation von *Kindermann (1984)*. I und II sind zusätzliche Parametersätze, um eine Verbesserung der aeroben Kapazität durch Reduzierung der glykolytischen Leistung bei konstanter aerober Leistungsfähigkeit zu verdeutlichen (*Mader, 1994*).

Die oben genannten Ausführungen zeigen relativ deutlich die Grenzen der herkömmlichen Interpretation der Ergebnisse. Um allerdings den wissenschaftlichen Aufwand der theoretischen Betrachtung zu legitimieren, erscheint es nach eigener Auffassung notwendig, dass konkrete Forschungsergebnisse vorgelegt oder zumindest zukunftsweisende Theorien entworfen werden, welche die Prozesse Trainingsbetreuung und –steuerung bereichern und optimieren können. Die Untersuchungen von *Pessenhofer & Schwaberg (1994)* sind diesbezüglich richtungsweisend. Wie in Kapitel 3.2.7 dargestellt, können somit die ermittelten metabolischen Parameter Laktatproduktion, -diffusion und -elimination als repräsentativ für den jeweiligen Probanden herangezogen werden. In einem weiteren Schritt müssten ihrer Auffassung folgend Kausalbeziehungen zwischen speziellen Trainingsmaßnahmen und Änderungen der identifizierten Modellparameter erstellt werden, um gezielt in den Trainingsprozess eingreifen zu können. Dadurch würde neben der „klassischen“ Trainingsmethodik ein zusätzlicher methodischer Komplex



entstehen. In Anlehnung an die Trainingswissenschaft könnte auch bezüglich der metabolischen Parameter ein Katalog von spezifischen Trainingsmaßnahmen entworfen werden, um die Zielstellungen des Trainings umzusetzen. Da nach Erkenntnissen von *Pessenhofer & Schwabegger (1994)* die Diffusions – Kenngröße trainingsabhängigen Änderungen unterliegt, wäre es beispielsweise denkbar, den Parameter Laktatdiffusion gezielt anzusteuern. Dadurch könnte neben der Steuergröße des Aeroben Flusses über eine weitere Variable verfügt werden, mit der eine Rechtsverschiebung der 4 mmol/l – Leistung ermöglicht werden kann (vgl. Abb. 22).

Da auch im Fachbereich Biomechanik seit längerer Zeit Überlegungen existieren, mit Hilfe der Muskelparameter der *Hill'schen* Gleichung zielgerichtet in den Trainingsprozess einzugreifen, erscheinen auch die Bemühungen in der LLD gerechtfertigt. Allerdings sollte diesbezüglich angemerkt werden, dass die oben genannten Muskel- und Stoffwechselfparameter trotz intensiver Forschung noch nicht in die Trainingslehre integriert werden konnten. Dieser Fakt könnte als Indiz für die Komplexität der Bestimmung biomechanischer und physiologischer Parameter sowie deren Anwendung im Trainingsprozess gewertet werden.

Zusammenfassend kann an dieser Stelle vermerkt werden, dass die Modellierung biologischer Prozesse ein sehr interessantes Forschungsfeld darstellt. Weiterhin stellen die Kenntnis der physiologischen Komplexität der Entstehung der LLK und die Nutzung mathematischer Modellierungsprozesse eher einen Zugewinn als eine unangemessene Verwissenschaftlichung im Bereich der LLD dar. Allerdings muss sich auch dieser wissenschaftliche Teilbereich an seinen Arbeitsergebnissen messen lassen, um den hohen Forschungsaufwand zu rechtfertigen.

#### **4.7 Kritische Betrachtung**

Im Zusammenhang mit dem literaturanalytischen Teil der vorliegenden Studie bleibt festzuhalten, dass selbst durch die Fokussierung der Arbeit auf laktatbasierte leistungsdiagnostische Untersuchungen die Subjektivität der Literaturo Auswahl nicht behoben werden kann. Außerdem ist es aus meiner Sicht kaum möglich, dem Anspruch auf Vollständigkeit der Forschungsbeiträge zu genügen, da die unüberschaubare Menge an Veröffentlichungen eine gewisse Selektion erfordert.



Allerdings wurde versucht, die grundlegenden und richtungsweisenden Publikationen bezüglich der einzelnen Fragestellungen herauszufiltern, um somit ein repräsentatives Bild des bestehenden Literaturstandes zu entwerfen.

Die in Arbeitshypothese IV (vgl. 2.5) formulierten Zielsetzungen, wurden als zukunftsweisender Forschungsansatz in die Arbeit integriert. Dazu war es notwendig, einen Großteil der leistungsdiagnostisch ausgerichteten Standorte Deutschlands zu kontaktieren, um nachfolgend in einen Informationsaustausch zu treten. Kritisch wäre diesbezüglich anzumerken, dass eine bessere Planung und Durchführung dieser Arbeitsschritte beispielsweise in Form eines Fragebogens zu einer höheren Rücklaufquote und damit zu einem höheren Informationsgehalt hätte führen können. Außerdem bleibt festzuhalten, dass der Entwurf einer Liste beeinflussender Kriterien (vgl. Tab. 7) ebenfalls von Subjektivität geprägt wird. Um allerdings der Zielstellung nach einer qualitativen Rangordnung der Modelle zur Bestimmung der aerob – anaeroben Schwelle gerecht zu werden, bestünde aus meiner Sicht die Notwendigkeit, eine experimentelle Untersuchung zur Quantifizierung des Einflusses durchzuführen und diese als Ansatz weiterführender Forschung zu nutzen. Auf Basis der bisherigen Informationen sind verallgemeinerungswürdige Aussagen somit nicht zulässig.

## 5 Zusammenfassung

Das Ziel der vorliegenden Arbeit bestand darin, die vorhandenen Konzepte zur Bestimmung der aerob – anaeroben Schwelle einer Qualitätsprüfung zu unterziehen. Dazu wurde in einem ersten Schritt mit Hilfe einer umfangreichen Literaturrecherche versucht, die Vielzahl der Forschungsbeiträge im Zusammenhang mit der LLD zu sondieren. Die kritische Auseinandersetzung mit den verschiedenen Schwellenmodellen stellte nachfolgend den wesentlichen Schwerpunkt der Literaturanalyse dar. Außerdem sollte es darum gehen, die Abhängigkeit der Ergebnisse leistungsdagnostischer Untersuchungen von grundlegenden Standardisierungsmaßnahmen und von beeinflussenden Kriterien zu hinterfragen. Vorrangiges Ziel war es, Richtlinien herauszufiltern, die es ermöglichen, die Qualität der Labor- und Feldtestergebnisse zu sichern und einen höchstmöglichen Transfer der erhaltenen Testergebnisse in die Praxis zu gewährleisten. Weiterhin wurden die bevorzugt angewendeten Schwellenkonzepte mit Hilfe einer Liste beeinflussender Kriterien gegeneinander geprüft, um diese anschließend qualitativ zu rangordnen. Eigene langjährige Erfahrungen mit leistungsdagnostischen Untersuchungen eröffneten mir im Zusammenhang mit den aus der LLD getroffenen Ableitungen die Möglichkeit, relevante Fragestellungen aufzuwerfen und kritisch zu reflektieren.

Die unter 2.5 aufgeführten Arbeitshypothesen fokussierten die inhaltliche Auseinandersetzung auf folgende zentrale Problemstellungen:

- Vor- und Nachteile fixer und individueller Schwellenkonzepte,
- Transfer der Labor- und Feldtestergebnisse in die Praxis,
- Modellierung biologischer Prozesse sowie
- qualitative Prüfung der bevorzugt angewendeten Schwellenkonzepte.

Im Anschluss sollen die Ergebnisse aus Literaturrecherche und Diskussion nochmals zusammenfassend dargestellt werden.

Individuelle Laktatschwellenkonzepte zur Bestimmung der aerob – anaeroben Schwelle scheinen, aufgrund der Berücksichtigung der interindividuell verschiedenen Laktatkinetik, fixen Konzepten überlegen zu sein. Es konnte in diesem Zusammenhang gezeigt werden, dass die Laktatkonzentration an der IAS innerhalb weiter Grenzen variiert. Somit ist die Verwendung fixer Laktatschwellen für die

Repräsentation einer spezifischen metabolischen Grenzsituation nur im Einzelfall geeignet. Allerdings sollte auch darauf hingewiesen werden, dass der teilweise kontroverse Forschungsstand auf dem Gebiet der LLD allgemeingültige Aussagen erschwert. Unter den Prämissen der Einhaltung grundlegender Verhaltensmaßnahmen vor und während der Durchführung der leistungsdiagnostischen Untersuchung und einer kompetenten wissenschaftlichen Interpretation der Ergebnisse dürfte die Nutzung der aerob – anaeroben Schwelle unabhängig von ihrer Bestimmungsmethode als sinnvoll erachtet werden. Unter Berücksichtigung des Literaturstandes und eigener leistungsdiagnostischer Erfahrungen kann die Arbeitshypothese I tendenziell angenommen werden.

Die Übertragbarkeit der Labor- und Feldtestergebnisse auf Training und Wettkampf kann als zentrale Problemstellung der vorliegenden Arbeit angesehen werden. Vor dem Hintergrund der Gesamtvariabilität des Parameters aerob – anaerobe Schwelle kommt den grundlegenden Standardisierungsmaßnahmen eine außerordentlich hohe Bedeutung zu. Nur durch deren Beachtung können die Potenzen der erhobenen Messwerte für die Trainings- und Wettkampfsteuerung ausgeschöpft werden. Es besteht somit die Notwendigkeit, die Messungen und die Auswertung der LLK höchstmöglich zu standardisieren, um einen optimalen Transfer der Ergebnisse der LLD zu gewährleisten. Die Arbeitshypothese II kann damit bestätigt werden.

Mit Hilfe der Arbeitshypothese III wurde der Versuch unternommen, die Möglichkeiten der theoretischen Betrachtung der Laktatkinetik unter Belastung bezüglich der Optimierung des Trainingsprozesses abzustecken. Es konnte gezeigt werden, dass sich die sportmedizinische Forschung noch weitgehend im nichttheoretischen experimentellen Stadium befindet. Somit scheint die Modellierung biologischer Prozesse von modifizierender Bedeutung zu sein. Außerdem bleibt festzuhalten, dass die Kenntnis der physiologischen Komplexität der Entstehung der LLK und die Nutzung mathematischer Modellierungsprozesse eher einen Zugewinn als eine unangemessene Verwissenschaftlichung im Bereich der LLD darstellen. Da die Einführung mathematischer Modelle zur Interpretation leistungsdiagnostischer Untersuchungen mehr Transparenz und Objektivität in die Beurteilung der gewonnenen Ergebnisse bringt, ist die Arbeitshypothese III anzunehmen.

Durch den Entwurf einer Liste ausgewählter Kriterien (vgl. Tab. 7) wurde gezeigt, dass alle aufgeführten Schwellenkonzepte diversen Einflüssen unterliegen. Das

Modell von *Stegmann, Kindermann & Schnabel (1981a)* weist dabei die geringste Abhängigkeit auf und scheint unter den Prämissen der entsprechenden Auswahl des Belastungsschemas sowie der höchstmöglichen Standardisierung anderen Schwellenkonzepten überlegen zu sein. Um die Modelle zur Bestimmung der aerob – anaeroben Schwelle in eine qualitative Rangordnung zu überführen, wäre es allerdings notwendig, neben der umfassenden Literaturrecherche, eine experimentelle Untersuchung zur Quantifizierung des Einflusses durchzuführen. Aus diesem Grund kann die Arbeitshypothese IV nur teilweise bestätigt werden. Durch weiterführende Forschungen sollte es möglich sein, die angestrebte qualitative Rangordnung der Schwellenkonzepte zu entwerfen.

#### Ausblick und Schlussfolgerungen

Aus meiner Sicht sollte der integrative Gehalt der Aussage von *Bueno (1990)*, nach der das Schwellenkonzept im Allgemeinen kein Dogma ist, und die Ergebnisse der Anwendung dieses Konzepts nicht als eine Verpflichtung sondern vielmehr als eine Leitlinie aufzufassen sind, stärker in den Vordergrund rücken. Wissenschaftliche Anstrengungen dürften außerdem nicht dahingehend kanalisiert werden, das eigene Konzept zu validieren beziehungsweise andere zu falsifizieren. Vielmehr wäre es wünschenswert, wenn sich Sportmediziner und Trainingswissenschaftler der übergeordneten Aufgabe nach bestmöglicher Trainings- und Wettkampfsteuerung unterordnen würden. Weiterhin bleibt festzuhalten, dass die Ergebnisse der LLD sowie die getroffenen Ableitungen bei Beachtung grundlegender Verhaltensmaßnahmen ihrer diagnostischen und steuernden Funktion gerecht werden können. Durch den gezielten und variablen Einsatz der Parameter Laktatkonzentration, Herzfrequenz, Geschwindigkeit und Leistung besteht außerdem die Möglichkeit, die Regulation von Training und Wettkampf zu optimieren, ohne diese Prozesse übermäßig zu verwissenschaftlichen.

## 6 Literaturverzeichnis

- BACHL, N., BARON, R., SMEKAL, G., TSCHAN, H. (1994), *Validität sportartspezifischer Leistungsdiagnostik*. In: Clasing, D., Weicker, H., Böning, D. (Hrsg.), Stellenwert der Laktatbestimmung in der Leistungsdiagnostik. 165 – 73, Stuttgart – Jena – New York, Gustav Fischer
- BACHMANN, O., BURTSCHER, M. (1999), Kardiopulmonale und metabolische Reaktionen von zwei Hochleistungsduathleten bei einem Fahrradfeldtest im Vergleich zu einem Fahrradstufentest im Labor. Spectrum der Sportwissenschaften, 11 (Supplement), 87 - 93
- BALDARI, C., GUIDETTI, L. (2000), A Simple Method for Individual Anaerobic Threshold as Predictor of Max Lactate Steady State. Medicine and Science in Sports and Exercise, 32 (10), 1798 - 802
- BATSCHULET, A., ZIMMERMANN, C., SCHMID, K., BOUTELLIER, U., KNÖPFLI – LENZIN, C. (2004), Reproduzierbarkeit des maximalen Laktat – steady – states. Schweizerische Zeitschrift für Sportmedizin und Sporttraumatologie, 52 (4), 154 - 6
- BENEKE, R., LEITHÄUSER, R. – M., SCHWARZ, V., HECK, H. (2000), Maximales Laktat – Steady – State bei Kindern und Erwachsenen. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 51 (3), 100 - 4
- BETTE, K. – H. (2008), Doping im Leistungssport – zwischen individueller Schuld und kollektiver Verantwortung. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 59 (1), 5 - 11
- BILLAT, V. (1996), Use of Blood Lactate Measurements for Prediction of Exercise Performance and for Control of Training. Sports Medicine, 22 (3), 157 - 75
- BLEICHER, A., MADER, A., MESTER, J. (1998), Zur Interpretation von Laktatleistungskurven – experimentelle Ergebnisse mit computergestützten Nachberechnungen. Spectrum der Sportwissenschaften, 10 (1), 92 - 104
- BLEICHER, A., MADER, A., MESTER, J. (1999), Zur Interpretation von Laktatleistungskurven – experimentelle Ergebnisse mit computergestützten Nachberechnungen (2. Teil). Spectrum der Sportwissenschaften, 11 (1), 71 - 83
- BÖNING, D. (1994), *Stellenwert der Laktatbestimmung in der Leistungsdiagnostik – Schlußbetrachtung* - . In: Clasing, D., Weicker, H., Böning, D. (Hrsg.), Stellenwert der Laktatbestimmung in der Leistungsdiagnostik. 219 – 20, Stuttgart – Jena – New York, Gustav Fischer
- BRAUMANN, K. – M., BUSSE, M., MAASSEN, N. (1987), Zur Interpretation von Laktatleistungskurven. Leistungssport, 17 (4), 35 - 8
- BRAUMANN, K. – M., MAASSEN, N., BUSSE, M. (1988), Die Problematik der Interpretation trainingsbegleitender Laktatmessungen. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 39 (9), 365 - 8
- BRAUMANN, K. – M., TEGTBUR, U., BUSSE, M., MAASSEN, N. (1991), Die "Laktatsenke" – Eine Methode zur Ermittlung der individuellen Dauerleistungsgrenze. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 42 (6), 240 – 6

- BROOKS, G. A. (1985a), Anaerobic Threshold: Review of the Concept and Directions for Future Research. Medicine and Science in Sports and Exercise, 17 (1), 22 - 31
- BROOKS, G. A. (1985b), Response to Davis' Manuscript. Medicine and Science in Sports and Exercise, 17 (1), 19 - 21
- BUNC, V., HELLER, J., LESO, J., SPRYNAROVA, S., ZDANOWICZ, R. (1987), Ventilatory Threshold in Various Groups of Highly Trained Athletes. International Journal of Sports Medicine, 8 (4), 275 – 80
- BUENO, M. (1990), Die anaerobe Schwelle – Von der Euphorie zur Vertrauenskrise. Leistungssport, 20 (1), 13 - 7
- BUSSE, M., MAASSEN, N., BRAUMANN, M., KÖNIG, T. (1987), Neuorientierung in der Laktatdiagnostik: Laktat als Glykogenindikator. Leistungssport, 17 (5), 33 - 7
- COEN, B. (1997), *Individuelle anaerobe Schwelle. Methodik und Anwendung in der sportmedizinischen Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung leichtathletischer Laufdisziplinen*. In: Coen, B., Wissenschaftliche Berichte und Materialien des Bundesinstituts für Sportwissenschaft (BISp) Band 8 (1997). Köln, Sport und Buch Strauss
- CHENG, B., KUIPERS, H., SNYDER, A. – C., KEIZER, H. – A., JEUKENDRUP, A., HESSELINK, M. (1992), A New Approach for the Determination of Ventilatory and Lactate Thresholds. International Journal of Sports Medicine, 13 (7), 518 - 22
- COEN, B., SCHWARZ, L., URHAUSEN, A., KINDERMANN, W. (1991a), Control of Training in Middle- and Long-Distance Running by Means of the Individual Anaerobic Threshold. International Journal of Sports Medicine, 12 (6), 519 - 24
- COEN, B., URHAUSEN, A., SCHWARZ, L., KINDERMANN, W. (1991b), Trainingssteuerung ausgewählter Tempolaufprogramme im Mittel- und Langstreckenlauf. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 42 (Sonderheft), 492 - 8
- COEN, B., URHAUSEN, A., SCHWARZ, L., KINDERMANN, W. (1992), Trainingssteuerung im Mittel- und Langstreckenlauf anhand der individuellen anaeroben Schwelle. Leistungssport, 22 (2), 55 - 60
- COEN, B., URHAUSEN, A., AGUILAR, L., WEILER, B., KINDERMANN, W. (1994a), Examination of the Reliability of the Individual Anaerobic Threshold. International Journal of Sports Medicine, 15, 350
- COEN, B., URHAUSEN, A., KINDERMANN, W. (1994b), *Trainingssteuerung im Mittel- und Langstreckenlauf anhand der individuellen anaeroben Schwelle*. In: Clasing, D., Weicker, H., Böning, D. (Hrsg.), Stellenwert der Laktatbestimmung in der Leistungsdiagnostik. 89 – 103, Stuttgart – Jena – New York, Gustav Fischer
- COEN, B., URHAUSEN, A., KINDERMANN, W. (1996a), Verification of the Heart Rate Threshold. European Journal of Applied Physiology, 72, 281 - 2
- COEN, B., URHAUSEN, A., KINDERMANN, W. (1996b), Influence of the Exercise Protocol on the Individual Anaerobic Threshold Determined During an Increasing Exercise Test. International Journal of Sports Medicine, 17 (Supplement 1), 18
- COEN, B., URHAUSEN, A., HERRMANN, S., WEILER, B., KINDERMANN, W. (1996c), Belastungsdosierung von Dauerläufen unterschiedlicher Intensität anhand der



Parameter Herzfrequenz, Laktat und Katecholamine. Sportorthopädie – Sporttraumatologie, 12 (2), 96 - 101

COEN, B., URHAUSEN, A., SCHMITZ, P., KINDERMANN, W. (1998), The Incline (INC) of the Lactate Performance Curve Above the Individual Anaerobic Threshold (IAT). International Journal of Sports Medicine, 19 (Supplement 1), 21

DAVIS, J. A. (1985a), Anaerobic Threshold: Review of the Concept and Directions for Future Research. Medicine and Science in Sports and Exercise, 17 (1), 6 - 18

DAVIS, J. A. (1985b), Response to Brooks' Manuscript. Medicine and Science in Sports and Exercise, 17 (1), 32 - 4

DE MAREES, H. (2003), Sportphysiologie. (9. Aufl.). Köln, Strauss

DICKHUTH, H. H., WOHLFAHRT, B., HILDEBRAND, D., ROKITZKI, L., HUONKER, M., KEUL, J. (1988), Jahreszyklische Schwankungen der Ausdauerleistungsfähigkeit von hochtrainierten Mittelstreckenläufern. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 39 (9), 346 – 55

DICKHUTH, H. – H., AUFENANGER, W., SCHMIDT, P., SIMON, G., HUONKER, M., KEUL, J. (1989), Möglichkeiten und Grenzen der Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung im Mittel- und Langstreckenlauf. Leistungssport, 19 (4), 21 - 4

DICKHUTH, H. – H., RÖCKER, K., MAYER, F., NIEß, A., HORSTMANN, T., HEITKAMP, H. – C., DOLEZEL, P. (1996), Bedeutung der Leistungsdiagnostik und Trainingssteuerung bei Ausdauer- und Spportsportarten. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 47 (Sonderheft), 183 - 9

DICKHUTH, H. – H., RÖCKER, K., MAYER, F., KÖNIG, D., KORSTEN – RECK, U. (2004), Ausdauersport und kardiale Adaptation (Sporthetzer). Herz, 29, 373 - 80

DIETZE, A., DONATH, R., ROCKSTROH, K. (1974), Vergleichende Untersuchungen der Laktatkonzentrationen in Blutproben aus verschiedenen Entnahmestellen. Medizin und Sport, 14 (12), 370 - 9

DONATH, R., CLAUSNITZER, C., SCHÜLER, K. – P. (1969), Zur Bewertung des Blutlaktatverhaltens in der sportmedizinischen Funktionsdiagnostik. Medizin und Sport, 9 (12), 354 - 9

FAUDE, O. (2002), Kardiozirkulatorisches, metabolisches und ventilatorisches Profil vierstündiger Dauerbelastungen. Diplomarbeit, Universität des Saarlandes, Saarbrücken

FÖHRENBACH, R., Mader, A., Liesen, H., Heck, H., Vellage, E., Hollmann, W. (1985), Wettkampf- und Trainingssteuerung von Marathonläuferinnen und –läufern mittels leistungsdiagnostischer Felduntersuchungen. In: Franz, I. –W., Mellerowicz, H., Noack, W. (Hrsg.), Training und Sport zur Prävention und Rehabilitation in der technisierten Umwelt. 770 - 7, Berlin - Heidelberg, Springer

FRANK, I., BOUTELLIER, U., KNÖPFLI – LENZIN, C. (2004), Einfluss kohlenhydratreicher Nahrung auf das maximale Laktat – steady – state. Schweizerische Zeitschrift für Sportmedizin und Sporttraumatologie, 52 (4), 157 - 61

FRANKE, W., LUDWIG, U. (2007), Der verrätene Sport. Gütersloh. Zabert Sandmann



- FRÖHLICH, J., URHAUSEN, A., SEUL, U., KINDERMANN, W. (1989), Beeinflussung der individuellen anaeroben Schwelle durch kohlenhydratarme und -reiche Ernährung. Leistungssport, 19 (4), 18 - 20
- GABRIEL, H. H. W., URHAUSEN, A., SCHWARZ, S., WEILER, B., KINDERMANN, W. (1998), Cycle Ergometric Performance Capacity, Lactate and Respiratory Parameters During an Intensive Training Period of Endurance Athletes. International Journal of Sports Medicine, 19 (Supplement 1), 24
- GAISL, G., KÖNIG, H., PESSENHOFER, H., SCHWABERGER, G. (1980), Die Trainingsoptimierung im Mittel- und Langstreckenlauf mit Hilfe der Bestimmung des aerob – anaeroben Schwellenbereiches. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 31 (5), 131 - 40
- GRIESS, M., TEGTBUR, U., BRAUMANN, K. – M., BUSSE, M., MAASSEN, N. (1989), Eine Methode zur Ermittlung der Dauerleistungsgrenze im Schwimmsport. In: Böning, D., Braumann, K. - M., Busse, M., Maassen, N., Schmidt, W. (Hrsg.), Sport – Rettung oder Risiko für die Gesundheit?. 418 - 21, Köln, Deutscher Ärzte - Verlag
- HECK, H. (1990a), Laktat in der Leistungsdiagnostik. Schorndorf, Hofmann
- HECK, H. (1990b), Energiestoffwechsel und medizinische Leistungsdiagnostik. Schorndorf, Hofmann
- HECK, H. (2001), Aerob – anaerobe Schwelle. In: Löllgen, H., Erdmann, E. (Hrsg.), Ergometrie – Belastungsuntersuchungen in Klinik und Praxis. 207 – 19, Berlin – Heidelberg, Springer
- HECK, H. (2004), Leserbrief zum Beitrag von Kindermann, W. (2004, 1). Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 55 (10), 269 - 71
- HECK, H., MADER, A., LIESEN, H., HOLLMANN, W. (1982), Vorschlag zur Standardisierung leistungsdiagnostischer Untersuchungen auf dem Laufband. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 33 (9), 304 - 7
- HECK, H., HESS, G., MADER, A. (1985a), Vergleichende Untersuchung zu verschiedenen Laktat – Schwellenkonzepten, Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 36 (1), 19 – 25 und 36 (2), 40 - 52
- HECK, H., HOLLMANN, W. (1985b), Zur Standardisierung der Laufbandergometrie. In: Franz, I. – W., Mellerowicz, H., Noack, W. (Hrsg.), Training und Sport zur Prävention und Rehabilitation in der technisierten Umwelt. 81 - 7, Berlin - Heidelberg, Springer
- HECK, H., MADER, A., MÜLLER, R., HOLLMANN, W. (1986), Laktatschwellen und Trainingssteuerung, Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 37 (Sonderheft), 72 - 8
- HECK, H., ROSSKOPF, P., HIRSCH, A., HOBERG, T., HOPPE, W., REICHWEIN, R. (1991), Einfluss des Vorbelastungslaktats, der Pausendauer und des Belastungsanstiegs auf die Laktat – Senke. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 42 (6), 248 - 63
- HECK, H., ROSSKOPF, P. (1994), Grundlagen verschiedener Laktatschwellenkonzepte und ihre Bedeutung für die Trainingssteuerung. In: Clasing, D., Weicker, H., Böning, D. (Hrsg.), Stellenwert der Laktatbestimmung in der Leistungsdiagnostik. 111 – 31, Stuttgart – Jena – New York, Gustav Fischer
- HECK, H., MADER, A., SCHULZ, H. (1998), Grundlagen der anaeroben Leistungsdiagnostik. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 49 (Sonderheft 1), 50 - 5

- HECK, H., SCHULZ, H. (1999), *Gütekriterien in der sportmedizinischen Leistungsdiagnostik*. In: Hohmann, A., Wichmann, E., Carl, K. (Hrsg.), Wissenschaftliche Berichte und Materialien des Bundesinstituts für Sportwissenschaft (BISp) Band 3 (1999). 65 – 74, Köln, Sport und Buch Strauss
- HECK, H., SCHULZ, H. (2002), Methoden der anaeroben Leistungsdiagnostik. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 53 (7/8), 202 - 12
- HEDTKAMP, M., GÖTTE, M., ZIPF, K. – E. (1985), *Bestimmung verschiedener aerob – anaerober Schwellen und ihre Überprüfung im Dauertest, durchgeführt an 16 Mittel- und Langstreckenläufern und 10 Langstreckenläuferinnen*. In: Franz, I. – W., Mellerowicz, H., Noack, W. (Hrsg.), Training und Sport zur Prävention und Rehabilitation in der technisierten Umwelt. 813 – 8, Berlin - Heidelberg, Springer
- HEITKAMP, H. – C., FREY, A., VENTER, C., NIEß, A., HORSTMANN, T. (2003), *Triathlon: Gibt es eine Formel zur Übertragbarkeit der Schwellenherzfrequenz für Lauf- und Radtraining aus einer Ergometrie*. In: Jeschke, D., Lorenz, R. (Hrsg.), Wissenschaftliche Berichte und Materialien des Bundesinstituts für Sportwissenschaft (BISp) Band 4 (2003). 153 – 9, Köln, Sport und Buch Strauss
- HILLE, C. T., GEIGER, L. V. (1993), Mathematische Beschreibung der Laktatkinetik beim Stufentest und Umsetzung in eine datenbankorientierte Analysen – Software. Leistungssport, 23 (5), 46 - 51
- HOLLMANN, H., SCHÜRCH, P., HECK, H., LIESEN, H., MADER, A., ROST, R., HOLLMANN, W. (1987), Kardiopulmonale Reaktionen und aerob – anaerobe Schwelle bei verschiedenen Belastungsformen. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 38 (4), 144 - 56
- HOLLMANN, W. (1987), *Risikofaktoren in der Entwicklung des Hochleistungssports*. In: Rieckert, H. (Hrsg.), Sportmedizin – Kursbestimmung. 14 – 22, Berlin - Heidelberg, Springer
- HOLLMANN, W. (1999), Vor 40 Jahren: ventilatorische und Laktatschwelle – Wie es dazu kam. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 50 (10), 323 - 6
- HOLLMANN, W. (2007), 30 Jahre danach – Anti-Doping-Symposium des Deutschen Sportärztebundes 1977 in Kiel. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 58 (10), 349
- HUTSTEINER, H., REITENBACH, O., FROMME, A., VÖLKER, K., SIMON, G. (1999), Individuelle anaerobe Schwelle bei Radsportlern. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 50 (Sonderheft), 37
- KETTMANN, S., HUBER, G. (1994), *Laktatleistungskurven beim Straßenradsport*. In: Clasing, D., Weicker, H., Böning, D. (Hrsg.), Stellenwert der Laktatbestimmung in der Leistungsdiagnostik. 65 - 70, Stuttgart – Jena – New York, Gustav Fischer
- KEUL, J., KINDERMANN, W., SIMON, G. (1978), Die aerobe und anaerobe Kapazität als Grundlage für die Leistungsdiagnostik. Leistungssport, 8 (1), 22 – 32
- KEUL, J., SIMON, G., BERG, A., DICKHUTH, H. – H., GOERTTLER, I., KÜBEL, R. (1979), Bestimmung der individuellen anaeroben Schwelle zur Leistungsbewertung und Trainingsgestaltung. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 30 (7), 212 - 8

- KEUL, J., DICKHUTH, H. – H., BERG, A., LEHMANN, M., HUBER, G. (1981), Allgemeine und sportartspezifische Leistungsdiagnostik im Hochleistungsbereich. Leistungssport, 11 (5), 382 - 98
- KINDERMANN, W. (1978), Regeneration und Trainingsprozess in den Ausdauersportarten aus medizinischer Sicht. Leistungssport, 8 (4), 348 – 57
- KINDERMANN, W. (1979), Sportmedizin und ihre Bedeutung für die Gesamtmedizin. Saarländisches Ärzteblatt, 32 (11), 521 - 31
- KINDERMANN, W. (1984), Grundlagen der aeroben und anaeroben Leistungsdiagnostik. Schweizerische Zeitschrift für Sportmedizin und Sporttraumatologie, 32, 69 – 74
- KINDERMANN, W. (1985), *Laufbandergometrie zur Leistungsdiagnostik im Spitzensport*. In: Franz, I. – W., Mellerowicz, H., Noack, W. (Hrsg.), Training und Sport zur Prävention und Rehabilitation in der technisierten Umwelt. 68 - 80, Berlin - Heidelberg, Springer
- KINDERMANN, W. (1989), Schon wieder (immer noch) Laktat?. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 40 (9), 311
- KINDERMANN, W. (2004a), Anaerobe Schwelle. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 55 (6), 161 - 2
- KINDERMANN, W. (2004b), Antwortkommentar des Autors auf den Leserbrief von Heck, H. (2004), Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 55 (10), 271
- KINDERMANN, W., KEUL, J., REINDELL, H. (1977), *Arbeitsazidose bei verschiedenen körperlichen Belastungsformen*. In: Lenk, H. (Hrsg.), Handlungsmuster Leistungssport. 255 – 66, Schorndorf, Hofmann
- KINDERMANN, W., SIMON, G., KEUL, J. (1978), Dauertraining – Ermittlung der optimalen Trainingsherzfrequenz und Leistungsfähigkeit. Leistungssport, 8 (1), 34 – 9
- KINDERMANN, W., Coen, B. (1997), Importance of Aerobic – Anaerobic Threshold Concepts in the Training Management. International Journal of Sports Medicine, 18 (Supplement 2), 120
- KLEMM, W., LENGFELLNER, G., JESCHKE, D. (1992), *Einfluss einer 30-minütigen aeroben Vorbelastung auf leistungsdiagnostische Parameter bei Laufband- und Fahrradergometrie von Triathleten*. In: Bremer, D., Engelhardt, M., Hottenrott, K., Neumann, G., Pfützner, A. (Hrsg.) Triathlon und Sportwissenschaft Band 7. 139 – 46, Hamburg, Czwalina
- KOCH, H. J., RASCHKA, C. (1999), Empirische und mechanistische Auswertungsmodelle für Laktatkonzentrationskurven im Dauerleistungstest. Nagoya Journal of Medical Science, 62, 127 – 34
- KOCH, H. J., RASCHKA, C. (2001), Standardisierte Laktatproduktionsrate und Laktateliminationsrate nach maximaler Belastung als Kriterium der Leistungsdiagnostik. Österreichisches Journal für Sportmedizin, 31 (2), 30 - 4
- KULLMER, T., KINDERMANN, W., MÜCKE, E. (1987), Körperliche Leistungsfähigkeit und Herz – Kreislauf – Verhalten bei Fahrradergometrien unterschiedlicher Stufendauer. Herz/Kreislauf, 19, 209 - 13

- LIESEN, H., LUDEMANN, E., SCHMENGLER, D., FÖHRENBACH, R., MADER, A. (1985), Trainingssteuerung im Hochleistungssport: einige Aspekte und Beispiele. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 36 (1), 8 - 17
- MAASSEN, N., KUNTZ, T., WEISSENBACH, M., GEISS, K. – R., SCHNEIDER, G. (2003), *Auch bei hochintensiver Belastung können Trainierte bei gleichem Prozentsatz der VO<sub>2</sub>max nicht länger arbeiten als Trainierte*. In: Jeschke, D., Lorenz, R. (Hrsg.), Wissenschaftliche Berichte und Materialien des Bundesinstituts für Sportwissenschaft (BISp) Band 4 (2003). 93 – 100, Köln, Sport und Buch Strauss
- MADER, A. (1994), *Aussagekraft der Laktatleistungskurve in Kombination mit anaeroben Tests zur Bestimmung der Stoffwechselkapazität*. In: Clasing, D., Weicker, H., Böning, D. (Hrsg.), Stellenwert der Laktatbestimmung in der Leistungsdiagnostik. 133 – 152, Stuttgart – Jena – New York, Gustav Fischer
- MADER, A., LIESEN, H., HECK, H., PHILIPPI, H., ROST, R., SCHÜRCH, P., HOLLMANN, W. (1976), Zur Beurteilung der sportartspezifischen Ausdauerleistungsfähigkeit im Labor. Sportarzt und Sportmedizin, 27 (4), 80 – 8 und 27 (5), 109 – 12
- MADER, A., HECK, H., HOLLMANN, W. (1981), *Leistung und Leistungsbegrenzung des menschlichen Organismus, interpretiert am Modell thermodynamisch offener Systeme. Ein Beitrag zur Diskussion biologischer Leistungsgrenzen im Hochleistungssport*. In: Rieckert, H. (Hrsg.), Sport an der Grenze menschlicher Leistungsfähigkeit. 69 – 93, Berlin – Heidelberg – New York, Springer
- MADER, A., HECK, H. (1994), Energiestoffwechselregulation, Erweiterungen des theoretischen Konzepts und seiner Begründungen. – Nachweis der praktischen Nützlichkeit der Simulation des Energiestoffwechsels. Brennpunkte der Sportwissenschaft, 8 (2), 124 - 62
- MARTIN, D., CARL, K., LEHNERTZ, K. (1993), Handbuch Trainingslehre. (2. Aufl.). Schorndorf, Hofmann
- MELLEROWICZ, H. (1989), *Medizin und Sport – Gefährdung und Herausforderung*. In: Böning, D., Braumann, K. - M., Busse, M., Maassen, N., Schmidt, W. (Hrsg.), Sport – Rettung oder Risiko für die Gesundheit?. 29 – 33, Köln, Deutscher Ärzte - Verlag
- MEYER, T., KINDERMANN, W. (1999a), Die maximale Sauerstoffaufnahme (VO<sub>2</sub>max), Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 50 (9), 285 - 6
- MEYER, T., FORSTER, H., COEN, B., KINDERMANN, W. (1999b), Influence of Body Weight and Endurance Capacity on Running Economy in Long Distance Runners. International Journal of Sports Medicine, 20 (Supplement 1), 28
- MEYER, T., GABRIEL, H. H. W., KINDERMANN, W. (1999c), Is Determination of Exercise Intensities as Percentages of VO<sub>2</sub>max or HRmax Adequate?. Medicine and Science in Sports and Exercise, 31 (9), 1342 - 5
- MEYER, T., FAUDE, O., GABRIEL, H. H. W., KINDERMANN, W., (2000), Ventilatory Threshold and Individual Anaerobic Threshold are Reliable Prescriptors for Intensity of Cycling Training. Medicine and Science in Sports and Exercise, 32 (Supplement 5), 171
- MYERS, J., ASHLEY, E. (1997), Dangerous Curves. A Perspective on Exercise, Lactate and the Anaerobic Threshold. Chest, 111, 787 - 95



- NEUMANN, G. (1994), Sportmedizinische Standpunkte zur Wettkampfvorbereitung in Ausdauersportarten. Leistungssport, 24 (1), 49 - 52
- NEUMANN, G., SCHÜLER, K. – P. (1994), Sportmedizinische Funktionsdiagnostik. Leipzig – Berlin – Heidelberg, Barth
- NEUMANN, G., GOHLITZ, D. (1996), Trainingssteuerung im leichtathletischen Lauf mittels disziplinspezifischer Ausdauer tests. Leistungssport, 26 (1), 63 - 7
- PANSOLD, B., ROTH, W., ZINNER, J., HASART, E., GABRIEL, B. – M. (1982), Die Laktat-Leistungs-Kurve – ein Grundprinzip sportmedizinischer Leistungsdiagnostik, Medizin und Sport, 22 (4), 107 - 12
- PANSOLD, B., ZINNER, J., GABRIEL, B. – M. (1985), Zum Einsatz und zur Interpretation von Laktatbestimmungen in der Leistungsdiagnostik. Theorie und Praxis des Leistungssports, 23 (9/10), 98 - 160
- PESSENHOFER, H., SCHWABERGER, G., SCHMID, P. (1981), Zur Bestimmung des individuellen aerob – anaeroben Übergangs. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 32 (1), 15 – 7
- PESSENHOFER, H., SCHWABERGER, G., SAUSENG, N., KENNER, T. (1987), *Modellorientierte Berechnung der laktaziden Energiekomponente bei Kurzzeitbelastungen ausgehend vom Laktat – Konzentrationsverlauf im Blut*. In: Rieckert, H. (Hrsg.), Sportmedizin – Kursbestimmung. 477 - 81, Berlin - Heidelberg, Springer
- PESSENHOFER, H., SCHWABERGER, G. (1994), *Stellenwert der Laktatbestimmung in der Leistungsdiagnostik*. In: Clasing, D., Weicker, H., Böning, D. (Hrsg.), Stellenwert der Laktatbestimmung in der Leistungsdiagnostik. 153 – 64, Stuttgart – Jena – New York, Gustav Fischer
- PROKOP, L. (1989), *Grenzen der Sportmedizin bei der Leistungssteigerung*. In: Böning, D., Braumann, K. - M., Busse, M., Maassen, N., Schmidt, W. (Hrsg.), Sport – Rettung oder Risiko für die Gesundheit?. 519 - 24, Köln, Deutscher Ärzte - Verlag
- RIEDER, T., WEILER, B., KINDERMANN, W. (1987a), *Beziehung zwischen Marathonzeit und Laufgeschwindigkeit der anaeroben Schwelle*. In: Rieckert, H. (Hrsg.), Sportmedizin – Kursbestimmung. 488 - 91, Berlin - Heidelberg, Springer
- RIEDER, T., KULLMER, T., KINDERMANN, W. (1987b), Aerobe und anaerobe Laufbanddiagnostik. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 38 (8), 318 - 22
- RÖCKER, K., DICKHUTH, H. H. (1994), *Einige Aspekte zur Festlegung der Dauerleistungsgrenze*. In: Clasing, D., Weicker, H., Böning, D. (Hrsg.), Stellenwert der Laktatbestimmung in der Leistungsdiagnostik. 29 – 36, Stuttgart – Jena – New York, Gustav Fischer
- RÖCKER, K., SCHOTTE, O., NIEß, A., HEITKAMP, H. – C., DICKHUTH, H. – H. (1997), Laufbandtestdaten und Wettkampfprognosen für den Langstreckenlauf. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 48 (9), 315 - 23
- SCHMIDT, A., LIM, W. – K., HAAKER, R., SIMON, G. (1993), Akuter Einfluss eines intensiven Trainings auf Leistungsfähigkeit, Herzfrequenz- und Laktatverhalten während Laufbandergometerbelastung. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 44 (5), 184 - 92
- SCHNABEL, A., KINDERMANN, W., KEUL, J., SCHMITT, W. – M. (1979), Beurteilung der anaeroben Ausdauer ("Stehvermögen") im Labor. Leistungssport, 9 (6), 503 - 7

- SCHNABEL, A., KINDERMANN, W., SCHMITT, W. – M., BIRO, G., STEGMANN, H. (1982), Hormonal and Metabolic Consequences of Prolonged Running at the Individual Anaerobic Threshold and the Fixed Anaerobic Threshold of 4 mmol/l Lactate. International Journal of Sports Medicine, 3 (3), 163 - 8
- SCHNABEL, G., THIEß, G. (1993), Lexikon Sportwissenschaft. Berlin, Sportverlag
- SCHULZ, H., HECK, H. (2001), Ammoniak in der Leistungsdiagnostik, Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 52 (3), 107 - 8
- SCHULZ, H., HECK, H. (2003), Bedeutung der Ammoniakbestimmung bei leistungsdiagnostischen Untersuchungen. In: Jeschke, D., Lorenz, R. (Hrsg.), Wissenschaftliche Berichte und Materialien des Bundesinstituts für Sportwissenschaft (BISp) Band 4 (2003). 133 – 9, Köln, Sport und Buch Strauss
- SIMON, G., BERG, A., DICKHUTH, H. – H., SIMON – ALT, A., KEUL, J. (1981), Bestimmung der anaeroben Schwelle in Abhängigkeit vom Alter und von der Leistungsfähigkeit. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 32 (1), 7 – 14
- SIMON, G., HAAKER, R., JUNG, K., BOCKHORST, J. (1985), Verhalten von Laktat, Atem- und Blutgasen an der aeroben und anaeroben Schwelle. In: Franz, I. – W., Mellerowicz, H., Noack, W. (Hrsg.), Training und Sport zur Prävention und Rehabilitation in der technisierten Umwelt. 819 - 25, Berlin - Heidelberg, Springer
- SIMON, G., THIEßMANN, M. (1986), Ermittlung der aeroben Leistungsfähigkeit im Schwimmsport. Leistungssport, 16 (3), 29 - 31
- SJÖDIN, B., JACOBS, I. (1981), Onset of Blood Lactate Accumulation and Marathon Running Performance. International Journal of Sports Medicine, 2 (1), 23 – 6
- STEGMANN, H., KINDERMANN, W., SCHNABEL, A. (1981a), Lactate Kinetics and Individual Anaerobic Threshold. International Journal of Sports Medicine, 2 (3), 160 – 5
- STEGMANN, H., KINDERMANN, W. (1981b), Bestimmung der individuellen anaeroben Schwelle bei unterschiedlich Ausdauertrainierten aufgrund des Verhaltens der Laktatkinetik während der Arbeits- und Erholungsphase. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 32 (8), 213 – 21
- STEGMANN, H., KINDERMANN, W. (1982), Comparison of Prolonged Exercise Tests at the Individual Anaerobic Threshold and the Fixed Anaerobic Threshold of 4 mmol/l Lactate. International Journal of Sports Medicine, 3 (2), 105 – 10
- STEUER, M., HÖLTKE, V., JAKOB, E. (2003), Einfluss des Polynomgrades und des Startwertes der Auswertung auf Parameter der individuellen anaeroben Schwelle. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 54 (7/8), 68
- STOCKHAUSEN, W., MAIER, J., TINSEL, J., DEUS, U., LYCHATZ, S., KEUL, J. (1994), Laktatkinetik und Leistungsdiagnostik im Radsport. In: Clasing, D., Weicker, H., Böning, D. (Hrsg.), Stellenwert der Laktatbestimmung in der Leistungsdiagnostik. 71 - 9, Stuttgart – Jena – New York, Gustav Fischer
- STOCKHAUSEN, W., HUBER, G., MAIER, J. – B., TINSEL, J., KEUL, J. (1995), Ein einzelzeitiges Verfahren zur Bestimmung des maximalen Laktat – Steady – State auf dem Fahrradergometer. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 46 (6), 291 - 302

- SZÖGY, A., BÖHMER, D., AMBRUS, P., BRUNE, S. (1984), Zur Bestimmung der anaeroben Kapazität bei Radrennfahrern. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 35 (5), 153 - 60
- TSCHOPP, M., HELD, T., VILLIGER, B., MARTI, B. (2001), Qualitätsstandards in der Ausdauerleistungsdiagnostik. Schweizerische Zeitschrift für Sportmedizin und Sporttraumatologie, 49 (2), 57 - 66
- URHAUSEN, A., HECKMANN, M., KINDERMANN, W. (1988), Ammoniakverhalten bei erschöpfender Ausdauerbelastung. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 39 (9), 354 - 65
- URHAUSEN, A., COEN, B., WEILER, B., KINDERMANN, W. (1989), Bestimmung der anaeroben Schwelle mittels Conconi – Test und Laktatmessungen, Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 40 (11), 402 – 10
- URHAUSEN, A., WEILER, B., KINDERMANN, W. (1992), Sympathische Aktivität und Herzfrequenzverhalten bei Ausdauerbelastungen unterschiedlicher Intensität. Deutsche Zeitschrift für Sportmedizin, 43 (10), 446 - 8
- URHAUSEN, A., COEN, B., WEILER, B., KINDERMANN, W. (1993), Individual Anaerobic Threshold and Maximum Lactate Steady State. International Journal of Sports Medicine, 14 (3), 134 - 9
- URHAUSEN, A., COEN, B., WEILER, B., KINDERMANN, W. (1994), *Individuelle anaerobe Schwelle und Laktat steady state bei Ausdauerbelastungen*. In: Clasing, D., Weicker, H., Böning, D. (Hrsg.), Stellenwert der Laktatbestimmung in der Leistungsdiagnostik. 37 – 45, Stuttgart – Jena – New York, Gustav Fischer
- VAN SCHUYLENBERGH, R., VANDEN EYNDE, B., HESPEL, P. (2004), Correlations Between Lactate and Ventilatory Thresholds and the Maximal Lactate Steady State in Elite Cyclists. International Journal of Sports Medicine, 25, 403 – 8
- WASSERMAN, K., WHIPP, B. – J., KOYAL, S. – N., BEAVER, W. – L. (1973), Anaerobic Threshold and Respiratory Gas Exchange During Exercise. Journal of Applied Physiology, 35 (2), 236 – 43
- WEICKER, H., BRAUMANN, K. – M. (1994), *Zusätzliche Untersuchungsparameter, die die Interpretationen des Laktatschwellenbereichs unterstützen*. In: Clasing, D., Weicker, H., Böning, D. (Hrsg.), Stellenwert der Laktatbestimmung in der Leistungsdiagnostik. 229 - 32, Stuttgart – Jena – New York, Gustav Fischer
- WEILER, B., URHAUSEN, A., MEYER, T., SCHAMMNE, D., KINDERMANN, W. (1999), Specific Strength – Endurance and Cycle Ergometry in Cyclists. International Journal of Sports Medicine, 20 (Supplement 1), 28
- WENK, F. (2005), Charakteristika ergospirometrischer und metabolischer Parameter während submaximaler Belastung über 100 Minuten auf einem Fahrradergometer. Dissertation. Bayerische Julius – Maximilians – Universität, Würzburg
- WONISCH, M., HOFMANN, P., POKAN, R., KRAXNER, W., HÖDL, R., MAIER, R., WATZINGER, N., SMEKAL, G., KLEIN, W., FRUHWALD, F. – M. (2003), Spiroergometrie in der Kardiologie – Grundlagen der Physiologie und Terminologie. Journal für Kardiologie, 10 (9), 383 – 0
- ZINNER, L., PANSOLD, B., BUCKWITZ, R. (1993), Computergestützte Auswertung von Stufentests in der Leistungsdiagnostik. Leistungssport, 23 (2), 21 – 6



## **Erklärung**

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel verfasst habe.

Jena, den 26.06.2008

Stefan Brünner